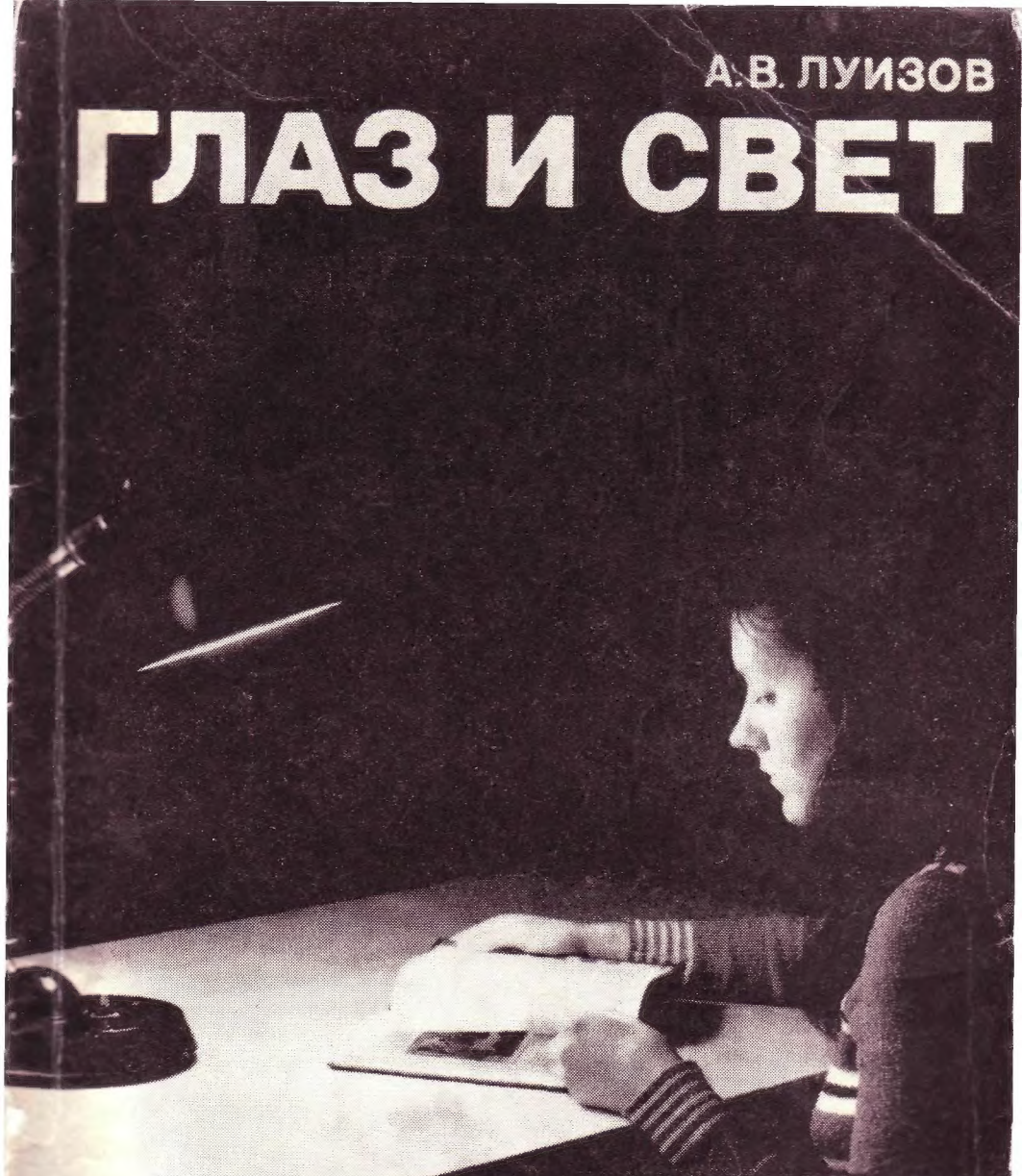
А.В. ЛУИЗОВ

ГЛАЗ И СВЕТ



СОЗДАНИЕ ОСВЕЩЕНИЯ, НАИБОЛЕЕ ПРИСПОСОБЛЕННОГО К ПОТРЕБНОСТЯМ ГЛАЗА, – ОСНОВНАЯ ЗАДАЧА СВЕТОТЕХНИКИ. ЧТОБЫ СОЗНАТЕЛЬНО ПОДХОДИТЬ К РЕШЕНИЮ ТАКОЙ ЗАДАЧИ, НЕОБХОДИМО ЗНАТЬ ХОТЯ БЫ ОСНОВЫ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИКИ.

SCANNED BY MORI'QUESSIR

А. В. ЛУИЗОВ

ГЛАЗ И СВЕТ

Ленинград
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
Ленинградское отделение
1983

ББК 31.294
Л 83
УДК 621.84:535.3

Рецензент *Н. В. Болдырев*

Луизов А. В.

Л 83 Глаз и свет. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. — 144 с., ил.

55 к.

В книге даются сведения об устройстве и работе глаза-приемника информации, получаемой человеком с помощью света. Определяется зависимость зрительных функций от световой обстановки. Рассматриваются вопросы создания оптимальных световых условий для зрительной работы. Материал приведен к виду, удобному для практического использования при решении некоторых светотехнических задач, расчете сигнальных устройств, при конструировании наблюдательных приборов, при определении видимости вооруженным и невооруженным глазом.

Книга предназначена широкому кругу специалистов, которым в своей работе приходится учитывать особенности и свойства зрения.

Л $\frac{2302060000-105}{051\ (01)-83}$ 189—82

ББК 31.294
6П2.19

© Энергоатомиздат, 1983

$A_{сф}$ — сферическая аберрация, $м^{-1}$; дптр (диоптрия)
A_R — аметропия, $м^{-1}$; дптр
A_{PR} — объем аккомодации, $м^{-1}$; дптр
$A(t)$ — функция затухания
a — коэффициент поглощения
B — светлота
b — отношение сигнала к шуму
C — информационная пропускная способность глаза, бит/с
D — диаметр входного зрачка прибора, см
$D_ф$ — оптическая плотность светофильтра
$d_г$ — диаметр зрачка глаза, см
E — освещенность, блеск, лк
$E_э$ — эффективный блеск, лк
f — переднее фокусное расстояние глаза, мм
f' — заднее фокусное расстояние глаза, мм
F — рефракция глаза, $м^{-1}$, дптр
H — количество информации, бит
J — сила света, кд
h — расстояние от оптической оси, см
K — контраст
$K_э$ — эффективный контраст
k — информационный коэффициент качества прибора
L — яркость, $кд/м^2$ (прежнее название — нит)
$L_э$ — эффективная яркость, $кд/м^2$
L_{eq} — эквивалентная яркость, $кд/м^2$
l — расстояние вдоль оптической оси, мм
$l_г$ — длина глаза, мм
N — число элементов изображения
n — число квантов
$n_г$ — показатель преломления глазных сред
P — мощность (поток) излучения, Вт
p — чистота цвета
Q — энергия, Дж; эрг
Q_v — световая энергия, лм·с
$Q_{vп}$ — пороговая световая энергия для периферического зрения, лм·с
$Q_{vц}$ — пороговая световая энергия для центрального зрения, лм·с
S_c — световая чувствительность, $(кд/м^2)^{-1}$
s — показатель ослепленности
T — период, с
t — время, с
u — угол между осью (оптической или зрительной) и входящим лучом, ...°
V — острота зрения
$V(\lambda)$ — относительная спектральная световая эффективность излучения
W — вероятность
α — угловой размер предмета, рад
2β — угол поля зрения, ...°
Γ — угловое увеличение прибора
δ — предельный угол разрешения, рад, ...′
ε — пороговый контраст
λ — длина волны, нм
ν — частота, $с^{-1}$
ρ — коэффициент отражения
σ — площадь, $м^2$
τ — промежуток времени, с; мс
Φ — световой поток, лм
φ — отношение светлой части периода ко всему периоду при стробоскопическом наблюдении
ϑ — время инерции, с
ω — телесный угол, ср

В одной из своих книг [4] акад. С. И. Вавилов приводит многочисленные доказательства «неоспоримого родства глаза и Солнца». «Глаз нельзя понять, не зная Солнца. Наоборот, по свойствам Солнца можно в общих чертах теоретически наметить особенности глаза, какими они должны быть, не зная их наперед».

Действительно, глаз идеально приспособлен к солнечному свету, к восприятию изображений предметов, освещенных прямым или рассеянным светом Солнца.

Но человеку, в особенности современному, не хватает естественного дневного света. Значительная часть работы и отдыха человека протекает при искусственном освещении. И тут уже освещение следует приспосабливать к потребностям глаза, стремиться к тому, чтобы искусственные источники света, светильники, их размещение и так далее обеспечивали наибольший зрительный комфорт. Создание освещения, наиболее приспособленного к потребностям глаза,— основная задача светотехники. Чтобы сознательно подходить к ее решению, необходимо хорошо знать свойства глаза, основные функции зрения и его особенности, т. е. изучить хотя бы основы физиологической оптики.

Но если глаз создан Солнцем, то, казалось бы, задача оптимизации искусственного освещения не так уж сложна: оно должно быть максимально приближено к естественному дневному освещению. Однако оказывается, что такое простое рассуждение далеко не всегда справедливо, а иногда и совсем не верно. Во-первых, само понятие «дневной свет» весьма неопределенно. И спектральный состав, и интенсивность естественного света зависят от климата, погоды, подстилающей поверхности и распределения различных предметов на ней, от времени суток и т. д. Кроме того, если человек как биологический вид приспособился только к естественному свету, то со времени овладения огнем люди стали привыкать к свету костра, факела и т. д. Если днем человеку кажется естественным дневной свет, то вечером и ночью свет факела кажется ему более естественным, чем дневной. А освещение со спектральным составом солнечного света, особенно при сравнительно низких уровнях этого освещения, может вызывать вечером неприятное чувство, ощущение

дискомфорта. Значит, светотехник должен учитывать не только физиологические, но и психологические факторы. Кроме того, копировать естественное освещение технически чрезвычайно трудно, почти невозможно, да и экономически очень невыгодно, хотя бы потому, что редко требуются уровни освещенности такие, как днем. Каждый род деятельности человека требует своего освещения, определенной его интенсивности, а часто и определенного спектрального состава.

Следует еще учесть, что задача светотехники состоит не только в создании освещения для производственных и других помещений или открытых пространств. Световые табло, пульты управления, сигнальные и многие другие технические устройства требуют внимания светотехников и ставят перед ними подчас весьма трудные задачи, для решения которых особенно важно знать свойства зрения.

Таковы вкратце соображения, объясняющие соединение слов «глаз» и «свет» в названии этой книги.

Зрение дает человеку 90% информации о внешнем мире. Глаз служит ее приемником, а свет — материальным носителем. Отсюда ясно, что глаз не может не интересовать светотехников, и не только светотехников. Со свойствами зрения приходится сталкиваться и считаться работникам самых разнообразных отраслей науки и техники, как например, специалистам по кинотехнике, телевидению, оптотехнике, инженерной психологии. Особенно важно хорошо знать глаз при разработке проблем эргономики. Как известно, основная задача эргономики — обеспечить оптимальные условия работы системы человек — машина. Связь между оператором и машиной осуществляется различными способами, но очень часто основную роль в системе связи играет зрение. Если мы посмотрим многочисленные статьи по эргономике, то окажется, что львиная доля их посвящена зрительным проблемам. Образовался даже целый раздел науки, получивший название «офтальмоэргономика» [37]. Нужно сказать, что при решении эргономических задач различные стороны вопроса часто бывают так тесно переплетены, что уже трудно определить, где проходит граница между физиологической оптикой и эргономикой.

Развитие бионики возбудило новый интерес к зрению: если раньше старались различные технические устройства наилучшим образом приспособить к свойствам зрения, то теперь возникает проблема воспроизведения функций зрения в технических системах, в той или иной степени подражающих живому глазу. Необходимость идти по пути подражания природе была осознана после выяснения высокой степени совершенства глаза.

Между тем ознакомиться хотя бы с основами физиологической оптики довольно трудно. Сведения о функциях зрения рассеяны во множестве статей, а обобщающих монографий по физиологической оптике очень мало, во всяком случае на русском языке. Книга С. О. Майзеля «Свет и зрение» издана почти

полстолетия тому назад. Монография С. В. Кравкова «Глаз и его работа» [22] в последний раз переиздана в 1950 г. Характерно, что наиболее полные сведения о зрении можно найти в капитальном труде светотехника: В. В. Мешков в своей книге «Основы светотехники» [35] целый том посвящает физиологической оптике и колориметрии (1961 г.). В сжатой форме такой же материал приведен в книге В. В. Мешкова и М. М. Епанешникова «Осветительные установки» [36] (1972 г.).

В 1971 г. издательство «Наука» выпустило книгу «Физиология зрения» [48] как первую часть издания «Физиология сенсорных систем». Книга эта может служить ценным пособием при углубленном изучении того или иного раздела физиологической оптики, но рассчитана она в основном на биологов и физиологов. В ней мало данных, которые могут быть применены для практических расчетов. Кроме того, написана книга пятнадцатью авторами, и поэтому нельзя требовать от нее единства в подходе ко всему многообразию зрительных процессов.

А именно такое единство необходимо для того, чтобы монография была не очень объемистой и внутренне организованной. Приступая к работе над книгой «Глаз и свет», автор должен был провести целенаправленный отбор чрезвычайно обширных и часто противоречивых сведений о глазе и объединить весь отобранный материал общей основой. Такой основой для автора послужила последовательно проведенная идея о целесообразности устройства глаза. В процессе длительного приспособления к условиям жизни организма зрение достигло весьма высокой степени совершенства. Границу способностям зрения ставят только основные законы природы: первое и второе начала термодинамики, волновая и квантовая природа света. В тексте книги редко будут прямо высказываться такие идеи. Но они неизменно направляли автора в его исследованиях и при отборе и обработке литературных данных.

Автор старался сделать свою книгу как можно более удобной для практического использования, всюду, где это возможно, приводя количественные данные, необходимые для расчетов. Для удобства читателя расчетные формулы сведены вместе в конце книги. Но, конечно, весь текст необходим, чтобы обеспечить должный уровень понимания материала, сознательный подход к нему и рациональное его использование для практических целей.

ОРГАН ЗРЕНИЯ

1. Что называется глазом?

Слово «глаз» даже в разговорной речи имеет разные значения. Говоря, «у него на глазу бельмо», имеют в виду глазное яблоко. Но если скажут «здесь нужен глаз да глаз», то подразумевают, очевидно, напряженное внимание всей зрительной системы. Тут глаз отождествляется со зрением. Мы в большинстве случаев будем придавать слову «глаз» именно такое расширенное значение. Глаз — это орган зрения, а иногда и просто зрение. Можно сказать «функции зрения», а можно и «функции глаза».

Итак, орган зрения состоит из двух глазных яблок, двух зрительных нервов и части мозга, воспринимающей и перерабатывающей передаваемые по нервным волокнам сигналы. В результате наблюдаемая картина проецируется обратно в пространство предметов, более или менее точно совпадая с ними. Глазные яблоки находятся в углублениях черепа — глазницах и приводятся в движение с помощью мускулов.

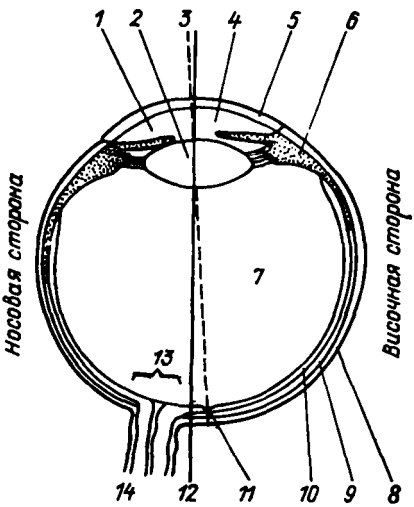


Рис. 1. Горизонтальный разрез правого глазного яблока

1 — радужка, *2* — хрусталик; *3* — ось фиксации; *4* — водянистая влага; *5* — роговица; *6* — цилиарная мышца; *7* — стекловидное тело; *8* — склера; *9* — сосудистая оболочка; *10* — сетчатка; *11* — фовеа (центральная ямка); *12* — оптическая ось; *13* — слепое пятно; *14* — зрительный нерв (к мозгу)

2. Глазное яблоко

Глазное яблоко человека (рис. 1) имеет форму, близкую к сферической. Внешняя плотная соединительнотканная оболочка глазного яблока, обеспечивающая его форму, называется склерой. Толщина ее около 1 мм. Под склерой находится более тонкая — около 0,3 мм — сосудистая оболочка, состоящая из сети кровеносных сосудов, питающих глазное яблоко. Внутренняя

оболочка называется сетчаткой или ретиной. Она выполняет основную функцию глаза: преобразовывает световое раздражение в нервное возбуждение, производит первичную обработку сигнала и направляет его в мозг. Волокна внутренней части сетчатки переходят в зрительный нерв, место вхождения которого в глазное яблоко называется соском зрительного нерва или слепым пятном.

В передней части склера переходит в более выпуклую, прозрачную роговую оболочку, или роговицу, толщина которой около 0,5 мм. Сосудистая оболочка спереди утолщается и переходит в ресничное тело и радужную оболочку, в центре которой расположено отверстие — зрачок. Находящиеся в радужной оболочке кольцевые и радиальные мышечные волокна производят сужение или расширение зрачка. К ресничному телу прикреплена прозрачная двояковыпуклая линза — хрусталик.

Пространство между роговицей и радужной оболочкой называется передней камерой, пространство между радужной оболочкой и хрусталиком — задней камерой глаза. Обе камеры наполнены жидкостью, которая называется водянистой влагой. Остальная полость глазного яблока между хрусталиком и сетчаткой заполнена студенистым веществом, называемым стекловидным телом.

3. Нервные связи глаза

Зрительный нерв *1* (рис. 2) состоит из нервных волокон — их около миллиона. На пути к мозгу два нерва перекрещиваются. Перекрестье зрительных

Рис. 2. Связи глаза с мозгом

нервов называется хиазмой. После хиазмы *2* зрительные волокна идут дальше, образуя зрительные кантики *3*, и входят в части мозга, которые называются наружным *4* и внутренним *5* коленчатыми телами и подушкой зрительного

бугра *6*. Это промежуточные зрительные центры, важнейший из которых — наружное коленчатое тело. Оно состоит из шести слоев, в которых заканчиваются волокна зрительного нерва. Из промежуточных центров возбуждение передается конечным зрительным центрам в коре большого мозга по так называемым волокнам Грациоле.

Кроме такой прямой передачи возбуждения от сетчаток к мозговым центрам существует сложная обратная связь для управления, например, движениями глазных яблок. На рис. 2 в виде намека на обратную связь изображены начальные отрезки *7* глазодвигательных нервов.

Перераспределение нервных волокон в хиазме поясняется рисунком *3*. Для каждого глаза (глазного яблока) можно различать височную и носовую части поля зрения. Височная часть одного глаза лежит слева, другого глаза — справа, в то время как левая и правая части поля зрения обоих глаз ориентированы относительно глаз одинаково. На рисунке изображены только волокна, передающие возбуждение, вызываемое правой частью поля зрения. Видно, что они идут в левую половину мозга, не перекрещиваясь в хиазме друг с другом. Если же мы проведем аналогичным образом волокна, представляющие левую часть поля зрения, то окажется, что волокна левого глаза пересекут волокна, представляющие правую часть поля зрения правого глаза. Пользуясь другой терминологией, можно сказать, что волокна носовых частей поля зрения не пересекаются в хиазме, а височных частей — пересекаются. Такой ход зрительных волокон подтверждается неоднократно наблюдавшимися случаями гемиопсии — выпадения половины поля зрения — при поражении одной половины мозга. Если, например, поражена правая половина мозга, человек не видит того, что находится слева от него, но хорошо видит все, что расположено справа.

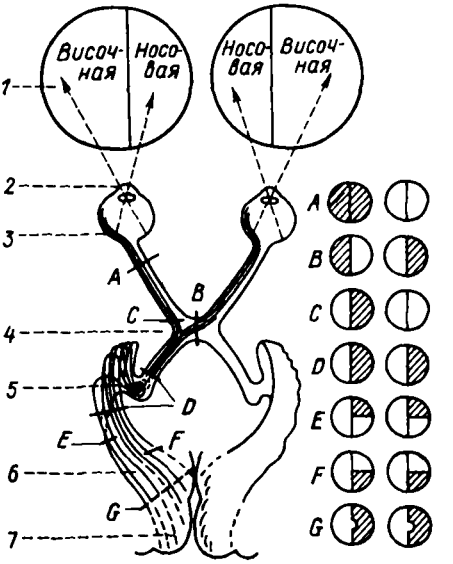


Рис. 3. Схема хода волокон зрительного нерва

1 — поля зрения; *2* — роговица; *3* — сетчатка; *4* — хиазма; *5* — подкорковые зрительные центры; *6* — волокна Грацноле; *7* — зрительная область коры

В левой части рис. 3 отмечены сечения *A*, *B*, *C*, ... зрительных путей, а справа даны схемы заполнения этих сечений волокнами, идущими от двух половин сетчаток левого (левый столбец) и правого (правый столбец) глаз. Штриховка схематично изображает связь волокон, проходящих через сечение, с сетчатками глаз. Например, через сечение *A* проходят волокна от обеих половин сетчатки левого глаза, а сетчатка другого глаза совсем не представлена. В сечении *B* представлены височные части обоих глаз. Сечения *E*, *F*, *G* рассекают только часть волокон.

Нужно сказать, что путь волокон, идущих от центральной части сетчатки, более сложен и еще недостаточно изучен. Еще сложнее пути зрительных возбуждений внутри мозга. В сущности, зрительные впечатления и даже просто свет — уровень внешней освещенности или яркости — оказывают влияние на всю нервную систему человека. Подчеркивая теснейшую связь глаза с нервной системой, сетчатку нередко называют частью мозга, вынесенной на периферию.

4. Глазодвигательная система

К глазному яблоку прикреплены окончания трех пар глазодвигательных мышц, другие концы которых скреплены с различными частями глазницы. Замечательно, что одна из мышц — верхняя косая — перекинута через блок, по которому она скользит при сокращении или расслаблении.

Центр вращения глазного яблока лежит на расстоянии приблизительно 13,5 мм от вершины роговицы, находясь очень близко к центру самого глазного яблока. Механизм вращения глаз чрезвычайно сложен и точен. Ведь в норме оси обоих глаз согласованно направляются в одну точку — точку фиксации, т. е. на то место, куда смотрит человек.

5. Взаимодействие частей органа зрения

Задача зрачка и прозрачных сред глазного яблока от роговицы до стекловидного тела — построить изображение внешних предметов на сетчатке. Задача сетчатки — воспринять изображение, провести его первичную обработку, переработать световую энергию в энергию нервных импульсов и направить их в мозг по волокнам зрительного нерва. Зрительный нерв доводит импульсы до центральной нервной системы, где заканчивается их обработка. Сводится вместе информация, переданная от сетчаток обоих глаз, и вырабатывается единый цветной объемный образ, который наше сознание проецирует обратно во внешний мир: ведь мы воспринимаем зрительный образ не внутри себя, а вне, непосредственно ощущаем предметы там (или приблизительно там), где они находятся.

Воспринятая картина анализируется в различных, уже не относящихся к зрению частях мозга, и в результате анализа принимаются решения, часто существенно влияющие на поведение человека. Кроме того, в порядке обратной связи отдаются приказания глазным яблокам, которые поворачиваются в сторону того или иного объекта, причем происходит автоматическая регулировка, не требующая контроля сознанием человека: может изменяться диаметр зрачка, изменяется напряжение аккомодации и т. п.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОПТИКА ГЛАЗА

6. Филогенетическое развитие глаза

Оптическая система глаза — результат длительного процесса постепенного совершенствования, продолжавшегося многие миллионы лет. Рассматривать отдельные ступени эволюции по образцам глаз ископаемых животных вряд ли возможно: их глаза сохранились плохо либо совсем не сохранились. Но различные виды организмов от одноклеточных до человека живут и сейчас и в своей иерархии в той или иной степени соответствуют процессу исторического развития живых существ.

Любому живому существу присуща чувствительность. Одноклеточные реагируют на механические воздействия и на изменение химического состава

среды. У них появляются зачатки чувств, связанных с непосредственным контактом организма с окружающим его веществом,— что-то вроде осязания, обоняния, вкуса. Довольно рано появляется и способность воспринимать колебания среды, т. е. зародыш слуха. Слух — первое чувство, дающее какие-то сведения о событиях, происходящих на некотором расстоянии от организма. Но сведения об очень удаленных явлениях может сообщить организму только свет. На живые существа воздействует Солнце, находящееся на расстоянии миллионов километров. И на основе способности ощущать свет начинают складываться зачатки зрения.

Даже одноклеточные воспринимают не только интенсивность, но иногда и направление света, если одна их сторона освещена сильнее, чем другая. Но одноклеточные прозрачны, а малому поглощению соответствует и слабая чувствительность к свету. И вот появляется в клетке скопление мелкозернистого пигмента — стигама, или глазное пятно — первый намек на глаз [48].

У многоклеточных на восприятии света специализируются уже обособленные клетки. Сначала они разбросаны в кожном покрове, потом собираются в группы. У некоторых медуз светочувствительные клетки лежат на дне углубления, что позволяет лучше определять направление на источник света Затем ямка делается глубже, края ее сближаются, появляется полый шар с небольшим отверстием, обращенным во внешнюю среду. Такая полость действует уже по принципу камеры-обскуры, образуя на дне (на стенке против отверстия) изображение окружающих предметов. На рис. 4 изображена схема органа зрения моллюска «наутилус». Глаз уже появился, но он еще нуждается в значительных усовершенствованиях. В каких?

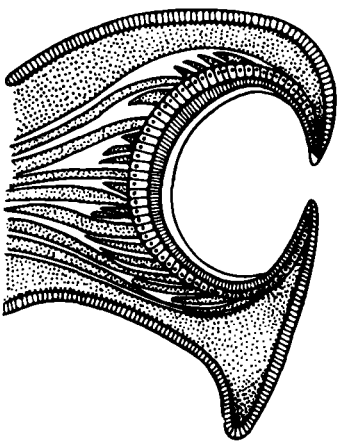


Рис. 4. Схема органа зрения моллюска «наутилус»

7. Глаз — камера-обскура

Попробуем рационально сконструировать систему по принципу глаза «наутилуса». Чтобы изображение было более четким, отверстие, заменяющее зрачок, должно быть малым. Пусть его диаметр d, а расстояние от отверстия до дна $l_г$. Удаленный точечный источник создает на дне глаза светлое пятно, диаметр которого тоже d. Пусть рядом с первым находится второй источник света, который дает другое пятно того же диаметра d. Чтобы пятна не накладывались друг на друга, расстояние между их центрами должно быть по меньшей мере d (пятна касаются своими окружностями). А угол между лучами, проведенными через центр отверстия к центрам пятен, найдем как отношение

$$\delta_к = d/l_г. \qquad (1)$$

Легко видеть, что $\delta_к$ — угловое расстояние между двумя точечными источниками света, которые «наутилус» еще может видеть раздельно, т. е. $\delta_к$ — угловой предел разрешения. Чем меньше $\delta_к$, тем больше острота зрения. Отсюда можно сделать вывод, что выгодно уменьшать d. Но при уменьшении отверстия возрастает вредное влияние дифракции, которая связана с волновой природой света. Угловой предел разрешения, обусловленный дифракцией, выражается формулой

$$\delta = 1{,}22\lambda/d. \qquad (2)$$

Положив $\lambda = 555$ нм $= 5{,}55 \cdot 10^{-5}$ см, получим

$$\delta = 6{,}77 \cdot 10^{-5}/d \qquad (3)$$

(здесь числитель — в сантиметрах).

Итак, геометрическая оптика — формула (1) требует уменьшения отверстия, а волновая — формула (3) — его увеличения. Разумный компромисс получим, положив $\delta_к = \delta$. Тогда

$$d^2 = 6{,}77 \cdot 10^{-5} l_г. \qquad (4)$$

Приняв глаз «наутилуса» за шарик диаметром 2 мм, т. е. считая $l_г = 0{,}2$ см, найдем $d = 0{,}00368$ см.

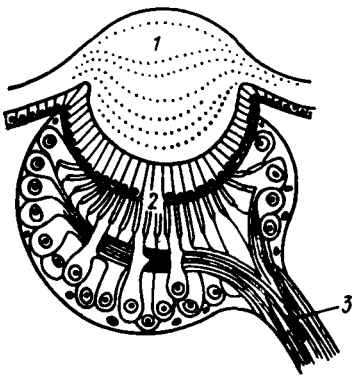


Рис. 5. Строение глаза паукообразного

1 — преломляющая среда; *2* — светочувствительные клетки; *3* — зрительный нерв

Угловой предел разрешения по формуле (1) или (3) $\delta = 1{,}84 \cdot 10^{-2} = 1°04'$.

Острота зрения человеческого глаза по меньшей мере в 60 раз больше: у человека $\delta \approx 1'$.

Может быть все дело просто в том, что рассмотренный нами примитивный глаз слишком мал? Действительно, положив $l_г = 2{,}4$ см (длина человеческого глаза), получим $d = 0{,}0128$ см и $\delta = 0{,}0053 = 18'$. Все же и теперь острота зрения в 20 раз меньше, чем у человека. Но даже не в этом основной недостаток глаза типа камеры-обскуры. Существенная характеристика оптической системы — ее отиосительное отверстие

$$A = d/f'. \qquad (5)$$

Освещенность изображения пропорциональна квадрату относительного отверстия. Для глаза «наутилуса» в формуле (5) нужно заменить f' длиной глаза $l_г$ и мы получим, что предельный угол попросту равен относительному отверстию:

$$\delta_к = A. \qquad (6)$$

Таким образом, увеличив в m раз остроту зрения, мы во столько же раз умеиьшим относительное отверстие и в m^2 раз — освещенность изображения. А ведь для зрения носителем информации служит в конечном счете свет.

Проведены даже расчеты, позволяющие в определенных условиях пересчитать световой поток (в люменах) в поток информации (в битах в секунду) [32]. Значит, уменьшение входящего в зрачок светового потока влечет за собой и уменьшение сведений об окружающей обстановке.

На следующих ступенях развития живых организмов неблагоприятная связь между предельным углом разрешения и относительным отверстием [формула (6)] разрывается: у человеческого глаза A в 40 раз больше, чем у рассмотренной нами камеры-обскуры длиной в 2,4 см (следовательно, A^2 в 1600 раз больше). Разорвать связь между A и δ природе удалось введением более или менее сложной оптической системы, фокусирующей свет, входящий в зрачок. На рис. 5 мы видим, что глаз паука уже заполнен преломляющим веществом, способствующим фокусировке изображений на сетчатке.

Поскольку как конечный результат эволюции нами будет рассмотрен глаз человека, будем считать в дальиейшем, что глаз окружен воздухом, показатель преломления которого равен единице. Какую же оптическую систему можно ввести в полость глаза? Проще всего некоторую среду с показателем преломления $n_г$, которая примет форму шара с радиусом r. Очевидно, что $r = l_г/2$. Лучи, идущие от далеких предметов, фокусируются на расстояини

f' от сферической поверхности. По известной формуле для преломления в одной сферической поверхности

$$f' = \frac{n_г}{n_г - 1}. \qquad (7)$$

Живые существа вырабатывают обычно вещества с довольно малым показателем преломления, примерно таким же, как у воды: $n_г = 1{,}333$. При таком n имеем $f' = 4r = 2l_г$. Значит, внутри сферы лучи не сойдутся, и на дне глаза будет сильно размытое изображение. Для близких предметов изображение будет еще хуже.

Есть несколько путей преодоления трудности: удлинение глаза в направлении хода лучей, уменьшение радиуса кривизны вещества в передней части глаза, включение внутрь глаза тела (в форме двояковыпуклой линзы) с большим показателем преломления. Различные животные используют тот или иной из этих способов, но чаще всего второй и третий.

8. Фасеточный глаз

В живой природе наблюдается еще особый, немагистральный путь развития глаза, свойственный в основном насекомым. Фасеточный глаз насекомого имеет форму полусферы, в которую свет может входить с любой сто-

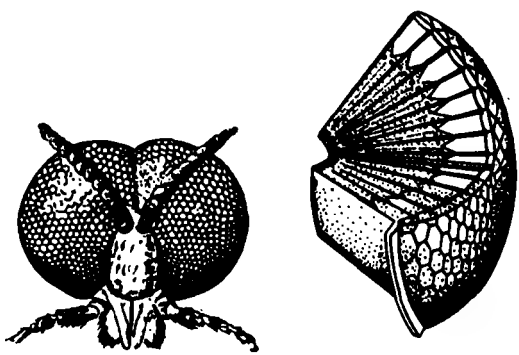


Рис. 6. Фасеточный глаз

Слева голова насекомого с двумя глазами, справа часть глаза с вырезанным сектором

роны в направлении того или иного радиуса сферической поверхности. Состоит полусфера из большого числа плотно прижатых друг к другу конусов с непрозрачными стенками — омматидиев. Внутри омматидиев находятся светочувствительные клетки и преломляющее вещество, направляющее свет вдоль оси омматидия (см. рис. 6). Поскольку каждый омматидий воспринимает свет, входящий по определенному направлению в пределах небольшого телесного угла, фасеточный глаз в целом способен воспринимать картину внешнего мира, хотя и не с большой точностью. Для некоторых насекомых предельный угол разрешения δ измеряется десятыми градуса. Поле зрения двух глаз насекомого охватывает почти полную сферу. Следует заметить, что для насекомого подобное устройство глаза, несомненно, рационально. Если бы глаз насекомого копировал в уменьшенном масштабе глаз высших животных, например глаз человека, зрачок был бы исключительно мал, около 0,1 мм. По площади он был бы раз в 50 меньше поверхности всего глаза. Следовательно, и поток информации, приходящийся на поверхность зрачка, был бы в 50 раз меньше потока информации, падающего на весь глаз. Малому зрачку соответствовала бы и малая разрешающая способность [см. формулу (3)], что

тоже снижает количество получаемой информации. Дальше мы увидим, что нечто похожее на омматидии включается как один из элементов в устройство глаза высших животных и человека.

9. Глаз человека

Фокусирующую систему глаза человека обычно сравнивают с фотокамерой. Существенная разница заключается, однако, в том, что по обе стороны фотообъектива находится обычно одна и та же среда — воздух. Глазное яблоко — система иммерсионная: пройдя сквозь роговицу, свет строит изображение в среде с показателем преломления n_r, отличающимся от единицы. Поэтому для глаза переднее фокусное расстояние f отличается от заднего f' не только по знаку, но и по абсолютному значению. В глазе несколько преломляющих поверхностей, причем форма каждой из них отличается от сферической, а центры их не лежат на одной прямой, т. е. система нецентрирована. Все это делает изучение и описание оптики глаза чрезвычайно затруднительным. Однако для практических расчетов вполне пригодно некоторое приближенное описание, в котором поверхности приняты за сферические и некоторая линия выбрана так, что центры всех сфер лежат к ней достаточно близко и ее можно считать оптической осью глаза.

10. Схематический глаз

В этом приближении на основании промера параметров многих реальных глаз и вычисления их средних величин можно составить представление о некотором «среднем» глазе человека. В табл. 1 даны параметры схематического глаза по Гульстранду [22]. Мы видим, что для фокусировки лучей от далекого предмета на сетчатке использованы два фактора, о которых мы уже упоминали: радиус кривизны передней поверхности роговицы не 12 мм (половина длины глаза), а 7,7 мм и внутри глаза находится тело — хрусталик — с показателем преломления, бо́льшим, чем показатель преломления водянистой влаги и стекловидного тела. Но хрусталик не просто увеличивает оптическую силу глаза. Изменяя свою выпуклость, он меняет рефракцию глаза. Таким образом происходит аккомодация, т. е. перестройка глаза в зависимости от расстояния до предмета, который нужно отчетливо увидеть. Аккомодация изменяет многие параметры глаза, ввиду чего в таблице два столбца: для покоя аккомодации и для максимальной аккомодации (фокусировка ближайшего предмета, который еще можно ясно видеть). Многие величины, однако, не зависят от состояния аккомодации, мы поместили их в середине между столбцами.

Все расстояния отсчитываются от вершины роговицы в направлении к сетчатке, радиусы кривизны — в том же направлении от сферической поверхности. Показатель преломления хрусталика различен в разных его точках. Такое распределение

Таблица 1. **Данные схематического глаза (по Гульстранду)**

Характеристика	Для покоя аккомодации	Для максимальной аккомодации
Показатель преломления, дптр		
Роговица	1,376	
Водянистая влага и стекловидное тело	1,336	
Хрусталик	1,386	
Эквивалентное ядро хрусталика	1,406	
Расстояние от вершины роговицы *		
Передняя поверхность роговицы	0	
Задняя « «	0,5	
Передняя поверхность хрусталика	3,6	3,2
Задняя « «	7,2	
Радиус кривизны **, мм		
Передняя поверхность роговицы	7,7	
Задняя « «	6,8	
Передняя поверхность хрусталика	10	5,33
Задняя « «	−6	−5,33
Преломляющая сила, дптр		
Передняя поверхность роговицы	48,83	
Задняя « «	−5,88	
Передняя поверхность хрусталика	5	9,375
Задняя « «	8,33	9,375
Ядро хрусталика	5,985	14,94
Система роговицы		
Преломляющая сила, дптр	43,05	
Местоположение* первой главной точки	−0,0496	
« второй « «	−0,0506	
Переднее фокусное расстояние	−23,227	
Заднее « «	31,031	
Система хрусталика		
Преломляющая сила, дптр	19,11	33,06
Местоположение* первой главной точки	5,678	5,145
« второй « «	5,808	5,225
Фокусное расстояние	69,908	40,416
Полная система глаза		
Преломляющая сила, дптр	58,64	70,57
Местоположение* первой главной точки	1,348	1,772
« второй « «	1,602	2,086
« переднего фокуса	−15,707	−12,397
« заднего »	24,387	21,016
« первой узловой точки	7,078	6,533
» второй « «	7,332	6,847
Переднее фокусное расстояние, мм	−17,055	−14,169
Заднее « « , мм	22,785	18,930
Местоположение* центральной ямки сетчатки	24	
Местоположение* ближайшей точки видения	—	−102,3
Радиус кривизны сетчатки, мм	−10,5	

* Отсчитывается в миллиметрах от вершины роговицы (внутрь глаза — положительное, наружу — отрицательное).

** Отсчитывается от сферической поверхности к центру кривизны.

показателя преломления в толще фокусирующей линзы может способствовать уменьшению ее сферической аберрации. В искусственных оптических системах среды с переменным показателем преломления стали применяться только в самые последние годы. Соответствующие оптические детали — так называемые сельфоки (self-focusing) могут решать много различных задач, в частности исправлять аберрацию. Но их расчет довольно сложен, а реальное осуществление очень трудно. Показатель преломления хрусталика непрерывно возрастает от периферии к центру. Условно этому показателю в табл. 1 придано только два значения — меньшее для поверхностной части (в таблице — хрусталик) и большее для внутренней (эквивалентное ядро хрусталика).

Когда мы фиксируем взгляд на какой-нибудь точке, ее изображение фокусируется в центральной ямке сетчатки — в месте, которое обеспечивает наибольшую остроту зрения. Линия, проходящая от фиксируемой точки к центральной ямке, называется зрительной осью. Она не совпадает с оптической осью глаза, а составляет с ней угол 5°.

11. Построение изображения в глазе

Хотя схема Гульстранда построена приближенно, с ее помощью можно производить расчеты с точностью, вполне достаточной для практических целей. Рассмотрим, например, вопрос,

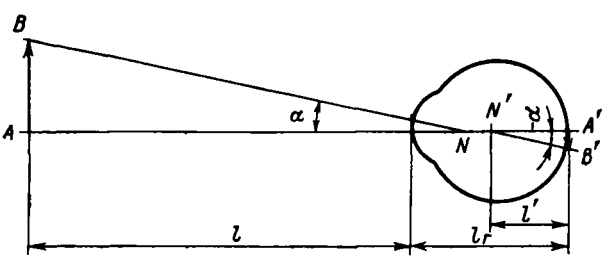


Рис. 7. Построение изображения в схематическом глазе

как построить изображение предмета на сетчатке и рассчитать размер изображения. Пусть предмет, высота которого y, находится на расстоянии l от глаза (рис. 7). Будем считать, что по абсолютному значению $l \gg f$ и что, следовательно, при покое аккомодации предмет будет сфокусирован на сетчатку. Поэтому изображение любой точки предмета будет там, где хотя бы один исходящий из нее луч коснется сетчатки. В той же точке (с той точностью, с какой происходит фокусировка) соберутся и остальные лучи, изображающие точку. Нижний конец предмета находится на оси системы, и поэтому один из лучей от точки A пройдет без преломления и попадет на сетчатку в точку A'. Луч от

точки B следует направить в переднюю узловую точку глаза N. Как известно, узловыми точками называются две сопряженные точки на оси системы, для которых угловое увеличение равно $+1$. Луч, направленный в первую узловую точку N, пройдет по линии, проходящей через вторую узловую точку N', параллельно первоначальному направлению. Пользуясь узловыми точками, легко построить изображение верхней части предмета: точка B' будет изображением точки B.

Чтобы рассчитать размер изображения y', т. е. расстояние между точками A' и B', найдем длину отрезка l', т. е. расстояние между точками N' и A'. В табл. 1 расстояние второй узловой точки от вершины роговицы 7,332 мм, а центральной ямки (лежит на сетчатке) 24 мм; отсюда

$$l' = 24 - 7{,}332 = 16{,}668 \text{ мм}. \tag{8}$$

Считая угол α малым, не будем делать различия между углом α и его тангенсом, т. е.

$$y/l = \operatorname{tg}\alpha = \alpha. \tag{9}$$

Размер изображения

$$y' = |A'B'| = \alpha l'. \tag{10}$$

Линейное увеличение найдем как отношение y к y':

$$\beta_y = \frac{y'}{y} = \frac{\alpha l'}{\alpha l} = \frac{l'}{l}. \tag{11}$$

Увеличение β_y — отрицательное ввиду отрицательного знаменателя l. На сетчатке получается обратное и уменьшенное изображение объектов. Линейный размер изображения обратно пропорционален расстоянию до объекта.

Неудобство построений и расчетов, подобных проведенным, связано с наличием двух узловых точек в схеме Гульстранда. Между тем расстояние между ними очень мало: всего 0,254 мм. Поэтому есть смысл провести дальнейшую схематизацию глаза, слив обе узловые точки в одну. Для многих расчетов такой упрощенный глаз — его называют редуцированным — обеспечивает вполне достаточную точность расчетов.

12. Редуцированный глаз

Существует несколько схем редуцированного глаза. В табл. 2 мы приводим данные редуцированного глаза по Вербицкому [22], наиболее близкие к данным глаза по Гульстранду. В редуцированном глазе только одна преломляющая поверхность — роговица, и весь глаз наполнен однородной средой с одним показателем преломления n_r. Именно поэтому обе узловые точки сливаются в одну, совпадающую с центром кривизны роговицы. Главные плоскости тоже сливаются в одну, и одна главная точка совпадает с вершиной роговицы.

Таблица 2

Параметр	Схематический глаз по Гульстранду	Редуцированный глаз по Вербицкому
Преломляющая сила (рефракция), дптр	58,64	58,82
Длина глаза, мм	24,0	23,4
Радиус кривизны роговицы, мм	7,7	6,8
Показатель преломления стекловидного тела	1,34	1,40
Раднус кривизны поверхности сетчатки, мм	10,5	10,2
Местоположение* главных точек, мм	—	0
« узловых « , мм	—	6,8
Переднее фокусное расстояние, мм	—17,055	—17,0
Задиее « « , мм	22,785	23,8

* Относительно вершины роговицы.

Построение изображения для редуцированного глаза (рис. 8) упрощается тем, что точку B' мы получаем простым проведением прямой через точки B и N. Для y' и β_y мы получаем формулы,

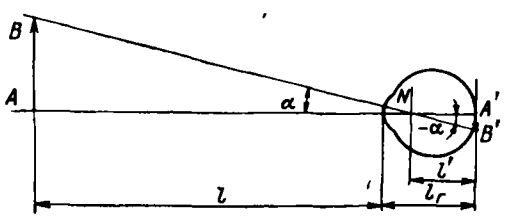


Рис. 8. Построение изображения в редуцированном глазе

аналогичные формулам (10) и (11); но отрезку l' можно теперь придать определенный смысл. Из табл. 2 видно, что вычисленное выше значение $l' = 16{,}6$ мм близко в редуцированном глазе к переднему фокусному расстоянию f, взятому с обратиым знаком. Есть некоторая разница (0,4 мм), но она, как мы сейчас увидим, неслучайна. По законам геометрической оптики параксиальное изображение точки A должно образоваться на оси системы в точке, лежащей на расстоянии f' от второй главной точки. В редуцированном глазе вторая главная точка совпадает с первой и лежит в вершине роговицы. От нее и нужно отсчитывать расстояние f'. Но $f' = 23{,}8$ мм, а вся длина глаза 23,4. Значит, параксиальное изображение точки A оказывается за сетчаткой, как раз на 0,4 мм дальше сетчатки. Можно подумать, что в построении редуцированного глаза допущена какая-то ошибка. Дело, однако, в том, что в своих рассуждениях мы дважды подчеркнули, что рассматриваются параксиальные лучи, т. е. лучи, проходящие близко к оси системы. Только они, проходя

параллельно оси системы, сходятся в главном фокусе. Лучи, проведшие дальше от оси, сходятся ближе фокуса вследствие сферической аберрации. Поэтому наиболее четкое изображение получается не в фокальной плоскости, а несколько ближе — в плоскости наилучшей фокусировки, вблизи которой и располагается лежащая на сетчатке точка A'.

Таким образом, разность l' и $|f|$ лежит в пределах той погрешности, которую мы допускаем, заменяя оптику широких пучков параксиальным приближением. Поэтому формулы (10) и (11) можно заменить формулами

$$y' = \alpha f \tag{12}$$

и

$$\beta_y = -f/l. \tag{13}$$

При приближении предмета к глазу, т. е. при значительном уменьшении абсолютного значения l, формулы (12) и (13) уже не могут применяться. Удержание изображения на сетчатке оказывается возможным только путем увеличения оптической силы, или, как ее еще называют, рефракции глаза F. В реальном глазе это осуществляется увеличением кривизны поверхностей хрусталика. Обозначим аккомодационную добавку к рефракции глаза

$$\Delta F = \frac{1}{|l|}. \tag{14}$$

Формально $\Delta F = 0$ только при $|l| = \infty$. Фактически аккомодацией можно пренебречь уже при $|l| \geqslant 5$ м, т. е. пренебречь изменением рефракции глаза на 0,2 дптр. В редуцированном глазе аккомодация учитывается формальным приемом: по Вербицкому на каждую диоптрию добавочной рефракции нужно увеличивать показатель преломления глазной среды на 0,004, а радиус кривизны роговицы, уменьшать на 0,04 мм. Пусть, например, $l = -25$ см., т. е. $|l| = 0{,}25$ м, а $\Delta F = 4$ дптр. При этом

$$n'_г = 1{,}40 + 4 \cdot 0{,}004 = 1{,}416;$$

$$r' = 6{,}8 - 4 \cdot 0{,}04 = 6{,}64 \text{ мм}.$$

Поскольку в редуцированном глазе только одна преломляющая поверхность, мы можем воспользоваться выведенной для этого случая формулой

$$\frac{n'_г}{l'_г} - \frac{1}{l} = \frac{n'_г - 1}{r'}, \tag{15}$$

где расстояния от вершины роговицы до предмета и до его изображения обозначены соответственно l и $l'_г$. Поскольку

$$f' = \frac{n'_г}{n_г - 1} r'; \tag{16}$$

$$\frac{n'_г}{l'_г} = \frac{1}{l} + \frac{n'_г}{f'}, \tag{17}$$

откуда

$$l'_r = \frac{n'_r f' |l|}{n'_r |l| - f'}. \qquad (18)$$

Подставив в формулы (16) и (18) значения величии для $F = 4$ дптр, получим $f' = 22{,}60$ мм и $l'_r = 24{,}1$ мм. Введем величину Δl, изменение которой характеризует смещение изображения при аккомодации: $\Delta l = l'_r - l_r$, где l_r — длина глаза по Вербицкому. При $\Delta F = 4$ дптр $\Delta l = 0{,}7$ мм, что заметно больше, чем при покое аккомодации, когда $\Delta l = 0{,}4$ мм, т. е. изображение смещается на 0,3 мм. Таким образом, предложенный Вербицким способ учета аккомодации при значительной сложности дает малую точность расчета. Для учета аккомодации можно предположить более простой способ, который обеспечивает, кроме того, значительно меньшее изменение Δl: при увеличении аккомодации на одну диоптрию умеиьшать радиус роговицы на 0,1 мм, а показатель преломлеиия сохранять постоянным и равным 1,40, т. е. в формулах (15)—(18) считать $n'_r = n_r = 1{,}40$. Результат такого расчета разности Δl с помощью формул (16) и (18) приведен в табл. 3. Видио, что Δl изменяется только в пределах 0,1 мм, а не 0,3 мм, как дают расчеты по Вербицкому.

Таблица 3. **Аккомодация редуцированного глаза**

$-l$, м	ΔF, дптр	r', мм	f', мм	l'_r, мм	Δl, мм
∞	0	6,8	23,80	23,8	0,4
1	1	6,7	23,45	23,8	0,4
0,5	2	6,6	23,10	23,9	0,5
0,33	3	6,5	22,75	23,9	0,5
0,25	4	6,4	22,40	23,9	0,5
0,20	5	6,3	22,05	23,9	0,5

13. Аберрации глаза

Как и всякой оптической системе, глазу присущи аберрации. Об одной из них — сферической аберрации мы уже упоминали. Сейчас следует сказать об аберрациях глаза несколько подробнее.

Аберрациями любой системы, дающей изображение, называются искажения, приводящие к тому, что изображение оказывается не вполне подобным геометрической проекции предмета на плоскость (или поверхность иной формы) и что каждая точка предмета изображается не точкой, а пятном с довольно сложным распределением яркости в нем.

На оси системы наблюдаются сферическая и хроматическая аберрации. Схема сферической аберрации изображена на рис. 9: чем дальше от оси проходит параллельный ей луч, тем ближе к линзе пересекает он ось. Наиболее удаленные от оси лучи пройдут от нее на расстоянии $h = D/2$, где D — диаметр входящего в линзу пучка, и соберутся в точке A_h, лежащей на расстоянии $\Delta f'$ от точки A — фокуса параксиальных лучей. Отрезок $\Delta f'$ называется продольной сферической аберрацией, выражеиной в единицах длины.

Однако обычно продольную сферическую аберрацию выражают в диоптриях и вычисляют по формуле

$$A_{сф} = \frac{1}{f' - \Delta f'} - \frac{1}{f'} = \frac{\Delta f'}{f'' - f'\Delta f'}. \qquad (19)$$

Здесь длину отрезков нужно брать в метрах.
Если $\Delta f' \ll f'$, формулу можно упростить:

$$A_{сф} = \Delta f'/f''. \qquad (20)$$

Показатель преломления $n_г$ зависит от длины волны света. Поэтому, если на линзу падает белый свет, лучи разных цветов соберутся в разных местах: фиолетовые соберутся ближе всего к линзе. В любом месте вместо белой точки будет получаться пятно, и притом не белое, а окрашенное. Снова можно провести расчет, аналогичный расчету по формуле (19), и получить значение хроматической аберрации $A_{хр}$.

Для любой точки, лежащей не на оси системы, приходится учитывать и другие аберрации. Лучи, лежащие в меридиональной плоскости, собираются в отрезок прямой на одном расстоянии от линзы, а лучи, лежащие в саггитальной плоскости (в плоскости, проходящей через ось пучка и перпендикулярной меридиональной плоскости), — в отрезок на другом расстоянии от линзы, перпендикулярный первому отрезку. В любом месте изображение точки получается в виде размытого несимметричного пятна. Эта аберрация называется астигматизмом косых пучков.

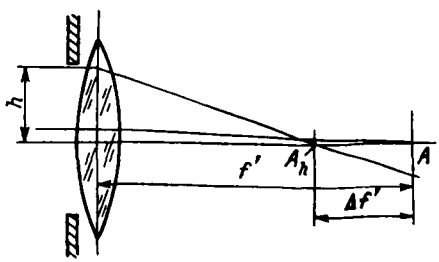


Рис. 9. Схема сферической аберрации

На какой-то поверхности эти размытия наименьшие, и именно здесь следует помещать экран, чтобы получить наиболее четкое изображение. Как правило, такая поверхность — не плоская, что очень неудобно во многих случаях, например для фотографирования, где поверхность кадра должна быть плоской. Отклонение поверхности наилучшей фокусировки от плоскости называется кривизной поля.

Существуют еще аберрации, искажающие форму всего изображения. Важнейшая из них — дисторсия — изменение увеличения при удалении от оптической оси системы.

Каковы же аберрации глаза? По данным Иванова [25] при зрачке 4 мм сферическая аберрация глаза $A_{сф} = 1$ дптр. То же значение имеет и хроматическая аберрация. Много это или мало? Поскольку рефракция глаза около 60 дптр, относительная погрешность рефракции глаза составляет менее двух процентов.

Точнее аберрации оцениваются степенью их влияния на разрешающую силу глаза или, как ее обычно называют, на остроту зрения. Острота зрения V обратно пропорциональна угловому пределу разрешения:

$$V = 1/\delta; \qquad (21)$$

δ, как правило, выражается в минутах. V — величина безразмерная.

Врачи обычно считают нормой $V = 1$. В действительности V зависит от многих условий, прежде всего от яркости фона L.

Диаметр зрачка тоже зависит от разных факторов, даже от эмоций человека. Но все же в основном диаметр зрачка $d_г$ зависит от яркости. В среднем эта зависимость выражается формулой [35]

$$d_г = 5 - 3 \operatorname{th}(0{,}4 \lg L), \qquad (22)$$

где th — тангенс гиперболический; $d_г$ — получается в миллиметрах.

Подробно об остроте зрения мы будем говорить дальше. Сейчас скажем только, что при яркости $L = 20$ кд/м^2 $d_г = 3{,}7$ мм и $\delta = 0{,}64'$. Если мы обратимся к дифракционной формуле (3) и посчитаем δ при $d = 0{,}37$ см, то, переводя радианы в минуты ($1' = 2{,}91 \cdot 10^{-4}$), получим практически ту же величину $\delta = 0{,}63$. Таким образом, фактически острота зрения ограничивается не аберрациями, а дифракцией. Именно такое требование и ставится к современным, хорошо исправленным объективам: их разрешающая сила, во всяком случае в центре поля зрения, должна быть дифракционной. Дальше исправление аберраций уже не помогает увеличить разрешающую силу.

Хроматическая аберрация, примерно равная сферической, как будто более опасна: она дает не просто пятно рассеяния, а окрашенное пятно. Однако в повседневной жизни мы никогда не замечаем цветных каемок вокруг видимых предметов. Их можно обнаружить только в специально поставленных опытах. Хроматическую аберрацию легко исправить поставленной перед глазом линзой с хроматической аберрацией обратного знака. Неоднократно проводились эксперименты с линзами такого рода. Однако применение их практически не изменяло ни остроты зрения глаза, ни вида находящихся в поле зрения предметов. Делались попытки исправить линзами также сферическую аберрацию глаза. И в этом случае улучшения остроты зрения не наблюдалось.

Следует заметить, что если просчитать ход лучей в схематическом глазе по Гульстранду, мы получим сферическую аберрацию, превышающую ту, которая наблюдается в реальном глазе. Объясняется это тем, что Гульстранд считал радиус кривизны роговицы постоянным, а в действительности в периферической зоне роговицы радиус кривизны больше, чем в центральной. Увеличение радиуса приводит к уменьшению преломляющей силы, т. е. к увеличению фокусного расстояния [см. формулу (16)] и, следовательно, к приближению фокуса крайних лучей к фокусу лучей параксиальных. В недавнее время и в технике стали применять линзы с асферическими поверхностями, хотя точное изготовление их сопряжено с большими трудностями.

Таким образом, оптическая система глаза исправлена достаточно хорошо, чтобы полностью использовать все возможности, предоставляемые волновой природой света.

АМЕТРОПИЯ И КОРРЕКЦИЯ ЗРЕНИЯ

14. Эмметропический глаз

Гульстранд в своей схеме оптики глаза приписал каждому ее параметру среднее из измеренных или иным путем найденных значений этого параметра для реальных человеческих глаз.

Параметры глаз у каждого человека могут сильно отличаться от указанных в схеме. Например, длина глаза может быть и больше, и меньше 24 мм. Однако такое отличие совсем необязательно ведет к ухудшению зрения. Более длинный глаз может обладать меньшей оптической силой, а более короткий — большей. В результате четкое изображение удаленных предметов может во всех случаях получаться на сетчатке и обеспечивать их хорошую видимость. В этих случаях изменения параметров компенсируют друг друга, глаз остается соразмерным или, употребляя принятый термин, эмметропическим.

15. Аметропия

Эмметропический глаз при покое аккомодации фокусирует изображение удаленных предметов на сетчатке. Если же изображение удаленных предметов получается не на сетчатке, глаз называют аметропическим, а соответствующий недостаток его — аметропией.

На рис. 10 схематически изображены три разновидности глаз. Оптическая сила всех трех глаз одинакова, и аметропия зависит только от длины глаза.

На рис. 10, *а* — эмметропический глаз. Параллельные лучи от далекого объекта сходятся на сетчатке. На рис. 10, *б* — слишком длинный аметропический глаз. Лучи от далекого предмета сходятся перед сетчаткой и дальше расходятся, образуя размытое пятно. Такой глаз называется миопическим или близоруким, а соответствующий недостаток зрения — близорукостью. Четко фокусируется только предмет, расположенный не дальше точки R, которую называют дальнейшей точкой глаза. Расстояние l_R от передней главной точки глаза H_1 до дальнейшей точки R характеризует степень близорукости: чем меньше l_R, тем сильнее близорукость. Обратная ей величина называется аметропией

$$A_R = 1/l_R. \tag{23}$$

При миопии аметропия отрицательна, так как точка R лежит перед глазами.

Рис. 10, *в* изображает слишком короткий глаз, у которого при покое аккомодации изображение удаленной точки получилось бы за сетчаткой, если бы лучи могли сквозь нее пройти.

На сетчатке опять получается размытое пятно. Здесь собрались бы лучи, сходящиеся в направлении некоторой точки R, лежащей за сетчаткой. Но таких лучей в природе не бывает, их можно создать только искусственно с помощью линзы. Точка R и здесь называется дальнейшей точкой, но теперь l_R уже положительно и соответственно положительной оказывается аметропия, вычисленная по формуле (23). Глаз с такой аметропией называют гиперметропическим или дальнозорким. Аметропия у дальнозоркого глаза положительна.

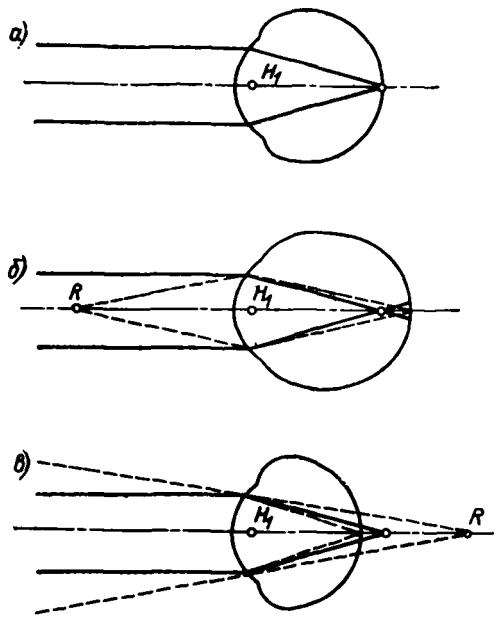


Рис. 10. Эмметропический глаз (*а*) и два вида аметропического глаза: близорукий (*б*) и дальнозоркий (*в*)

Человек, глаза которого близоруки, не видит ясно предметов, лежащих дальше его дальнейшей точки, что и оправдывает само название такой аметропии — близорукость.

Человек, глаза которого дальнозорки, при покое аккомодации не видит ясно ни близких, ни далеких предметов. Даже лучи, идущие из бесконечности, доходят до сетчатки, еще не фокусируясь. Еще более размытым оказывается изображение близких предметов. Поэтому человек дальнозоркий ничего не выигрывает от своей дальнозоркости. Если гиперметропия невелика, он может увидеть далекий предмет, например, звезду, но только с помощью аккомодации. Так что название «дальнозоркость» неудачно. Оно появилось, по-видимому, просто как понятие, противоположное близорукости.

При наибольшем напряжении аккомодации A_P глаз четко фокусирует на сетчатке некоторую точку P, которая лежит от него на расстоянии l_P и называется ближайшей точкой. Разность минимального напряжения (при покое аккомодации) и максимального напряжения аккомодации называется объемом аккомодации A_{PR}. Очевидно, что

$$A_{PR} = \frac{1}{l_R} - \frac{1}{l_P}. \qquad (24)$$

Сравним свойства зрения трех человек, имеющих одинаковый объем аккомодации $A_{PR} = 4$ дптр. Первый из них — эмметроп

($A_R = 0$), второй — миоп ($A_R = -5$), третий — гиперметроп ($A_R = 5$). Проведя вычисления по формуле (24), мы можем заключить, что так как для эмметропа $l_R = -\infty$, а $l_P = -0{,}25$ м, то он может ясно видеть любой предмет на расстоянии от 25 см до бесконечности. Для миопа $l_R = -0{,}2$ м; $l_P = -1/9 = -0{,}11$ м. Такой человек видит отчетливо предметы на расстоянии от 11 до 20 см. Для гиперметропа $l_R = 0{,}2$ м; $l_r = 1$ м. Такой человек не видит ясно никаких предметов, находящихся перед ним: обе точки, и дальнейшая и ближайшая, лежат за его глазами. Если бы гиперметропия была меньше, например 4 дптр, он мог бы ясно видеть звезды и практически все достаточно удаленные предметы при максимальном напряжении аккомодации. При гиперметропии 2 дптр $l_P = -0{,}5$ м и человек четко видит все находящееся от него в 50 см и дальше. Читать ему уже трудно, нужны очки.

16. Очки

Очки позволяют провести коррекцию зрения, т. е. исправить аметропию. Поставим перед глазом миопа рассеивающую линзу (отрицательную), такую, чтобы ее фокус совпал с точкой R на рис. 10. Линза сделает параллельные лучи, идущие от удаленного предмета, расходящимися, причем именно так, будто они выходят из точки R. Следовательно, лучи соберутся на сетчатке и миоп ясно увидит удаленный предмет. Если линза расположена близко к глазу, то ее фокусное расстояние $f \approx l_R$ и, следовательно, рефракция линзы равна аметропии. Таким образом, определяя аметропию глаза, тем самым определяют и силу корригирующей линзы. Если глаз гиперметропичен, фокус корригирующей линзы нужно совместить с точкой R гиперметропа. Поскольку для него величина l_R положительна, линза тоже должна быть положительной (собирающей) и ее оптическая сила должна быть равна аметропии глаза. Конечно, очковая линза отстоит на некоторое, хотя и небольшое, расстояние от глаза. Поэтому, строго говоря, $f \neq l_R$ и между аметропией и оптической силой корригирующей ее линзы должно быть некоторое различие. Но учитывать его приходится только при сильных аметропиях, когда отрезок l_R мал.

Стандартное расстояние линзы от глаза 12 мм. На такое расстояние и рассчитаны все очковые корригирующие линзы. Если почему-либо линзу нужно поставить на другом расстоянии от глаза, ее оптическую силу следует рассчитать особо. Такие пересчеты проведены, и существуют таблицы, в которых указаны аметропии глаза и соответствующие оптические силы корригирующих линз в зависимости от их расстояний от глаза.

Однако нередко бывают глаза, которые не поддаются исправлению обычными линзами со сферическими поверхностями. Мы упоминали уже об астигматизме косых пучков. Но довольно часто оптическая система глаза и на оси не дает точечного изображения ни на сетчатке, ни перед ней, ни за ней. Такой

недостаток глаза называют астигматизмом: аметропия астигматического глаза в различных меридианах различна. В таком случае находят два меридиана с наименьшей (иногда равной нулю) и наибольшей аметропией. Исправлять астигматизм приходится линзой тоже астигматической, например такой, у которой одна поверхность сферическая, а другая цилиндрическая.

Существенное значение имеет форма линзы. Теперь отказались от применения двояковыпуклых или двояковогнутых линз, хотя они дают достаточно хорошее изображение на своей оси. Но учитывается, что глаз очень подвижен, и когда он смотрит не через центральную часть линзы, появляются сильные аберрации, главным образом астигматизм косых пучков. Очертания предметов размываются, и чтобы ясно их увидеть, владельцу очков вместо поворота глаз приходится поворачивать голову. Сейчас применяют в основном менисковые линзы: выпукло-вогнутые и вогнуто-выпуклые. Их форма, определенная путем сложных расчетов, в значительной степени исправляет астигматизм косых пучков и расширяет поле зрения. Для исправления астигматизма обычно применяют линзы с торическими поверхностями, т. е. поверхностями с двумя различными радиусами кривизны в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Проведены сложные расчеты для линз различных рефракций и найдены формы, сводящие аберрационные искажения к минимуму. Человек в очках хорошо видит и прямо перед собой и по сторонам, если только очки правильно назначены и изготовлены.

17. Измерение аметропии

Для назначения очков, т. е. главным образом для определения аметропии и астигматизма, существует несколько методов. Назовем наиболее распространенные из них: 1) субъективное определение аметропии; 2) измерение глазным рефрактометром; 3) скиаскопия.

Первый метод называют субъективным [45] потому, что врачу приходится полагаться на ощущение пациента и его ответы. Пациента сажают на расстоянии пяти метров от хорошо освещенной таблицы испытательных тестов Головина — Сивцова (рис. 11). Таблица разделена на две половины: с одной стороны напечатаны буквы, с другой — кольцо Ландольта (рис. 12). Около каждой строки поставлены числа от 0,1 до 2, указывающие остроту зрения. Кольца Ландольта — основной тест для определения остроты зрения. Если размер разрыва h принять за единицу, то толщина кольца тоже равна единице, внешний диаметр — пяти, а внутренний — трем. Врач надевает на пациента пробную оправу и вставляет в нее щиток, закрывающий один глаз пациента. Пациент должен сказать врачу, на какой строке он еще видит, как повернуты кольца Ландольта: разрывом вверх, вниз, вправо или влево. Как правило, пациент может прочесть и буквы на той же строке. Таким образом определяется острота

зрения одного глаза. Потом щиток переставляют и исследуют другой глаз. Если острота зрения хотя бы одного глаза оказывается меньше единицы, врач начинает вставлять в оправу перед

Рис. 11. Таблица Головина — Сивцова

глазом линзы из набора очковых стекол. Если никакой из астигматических (сферических) линз не удается довести остроту зрения до единицы, врач обращается к астигматическим линзам. Тут приходится уже не просто поставить линзу, но и повернуть ее в оправе надлежащим образом. В результате врач может выписать рецепт, который выглядит, например, так, как на рис. 13. Кроме основной оптической силы линз (сфера) указана оптическая сила цилиндрической части (цил.) и угол между горизонтальной плоскостью и осью цилиндра (ось). Оси изображены также графически.

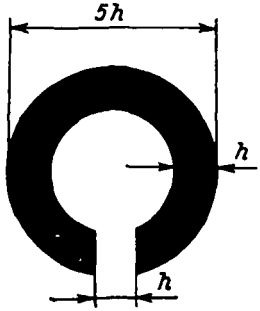


Рис. 12. Кольцо Ландольта

Очень важно, чтобы пациент получил не только правильный рецепт, но чтобы и выполнение его было точным: соблюдено расстояние между центрами линз, соответствующее межзрачковому расстоянию, правильно повернуты оси цилиндров, оправа обеспечивала необходимое расстояние от роговицы до стекла. И конечно, чтобы оптические силы линз были такими, как указано

в рецепте. Оптическая сила линзы измеряется диоптриметром, который, кроме того, позволяет найти и отметить центр линзы и оси цилиндра, если линза астигматическая.

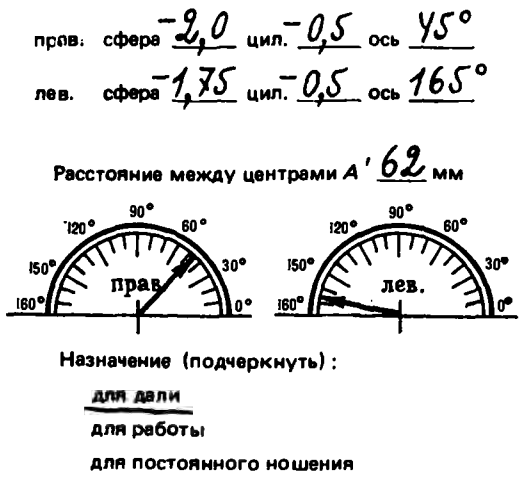


Рис. 13. Рецепт на очки

Идея устройства глазного рефрактометра заключается в том, чтобы врач мог видеть, насколько резко сфокусирован тест-

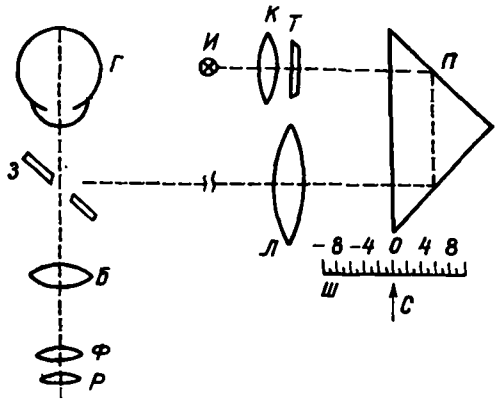


Рис. 14. Схема глазного рефрактометра

объект на сетчатке пациента. Схема глазного рефрактометра изображена на рис. 14.

Лампа *И* с помощью конденсора *К* освещает матовую пластинку с нанесенной на ней тестовой фигурой — маркой *Т*. После двух отражений от граней призмы *П* лучи света попадают в линзу *Л*. Призма *П* может приближаться к линзе *Л* или удаляться

от нее, причем положение призмы отмечается стелкой *С* на шкале *Ш*. Основное положение призмы *П* (стрелка *С* иа нуле) таково, что марка *Т* находится в фокальной плоскости линзы *Л* и от каждой точки марки из линзы выходят параллельные пучки лучей. Отражаясь от зеркала *З*, они попадают в исследуемый глаз пациента *Г* и образуют изображение на его сетчатке. Если глаз эмметропичен, параллельные пучки (без аккомодации) собираются на сетчатке и дают резкое изображение марки. Врач с помощью зрительной трубы (объектив *Б*, окуляр *Р — Ф*) видит сетчатку пациента и изображение марки и, если оно четко, убеждается, что глаз эмметропичен. Если же изображение размыто, врач смещает призму *П*, делая лучи от марки *Т* сходящимися или расходящимися и добиваясь резкого изображения марки на сетчатке. Когда это достигнуто, врач смотрит иа шкалу *Ш*, отградуированную в диоптриях аметропии пациента. При движении призмы перемещается линза *Ф*, обеспечивая хорошую фокусировку сетчатки пациента для глаза врача.

Следует заметить, что глазной рефрактометр рефракции глаза не измеряет: измеряется прибором только аметропия глаза, что, впрочем, и представляет иаибольший практический интерес.

Скиаскопия — другой объективный метод, чрезвычайно широко используемый врачами-офтальмологами при назначении очков, так как он требует довольно простого оборудования. Нужно прежде всего зеркало с небольшим отверстием или полупрозрачное зеркало.

Мы привыкли, что зрачки глаз всегда черные. Но мы просто не можем загляиуть в глаз в том же направлении, в каком на него падает свет. Офтальмологическое зеркало позволяет это делать. Врач ставит лампу сзади и несколько сбоку от пациента и, направляя зеркалом свет от лампы — зайчик — в зрачок ему, смотрит через зеркало на тот же зрачок. Врач видит зрачок сияющим красноватым светом, отраженным от сетчатки. Поворачивая зеркало, врач ведет зайчик по глазу пациента, благодаря чему перемещается по сетчатке освещенное пятио. На краю зрачка врач замечает тень, которая движется по мере поворота зеркала и, наконец, закрывает весь зрачок. Диагностическое значение имеет направление движения тени: движется ли она в ту же сторону, что и зайчик, или в обратную. Все зависит от того, находится глаз врача ближе или дальше дальнейшей точки пациеита. Ведь если предмет, находящийся в дальнейшей точке, фокусируется на сетчатке, то, значит, и точки сетчатки фокусируются в дальнейшей точке. В дальнейшей точке лучи, прошедшие через зрачок, перекрещиваются, чем и объясняется изменение направления видимого врачом движения теии. Прн некотором навыке врач достаточно точно находит положение остановки тени (зрачок либо весь сияет, либо весь гасиет) и, измерив расстояние до глаза пациеита, определяет l_R и, следовательно, аметропию A_R.

Правда, дальнейшая точка может находиться на большом расстоянии от глаза (у эмметропа $l_R = -\infty$) и даже за глазом. Но любой глаз можно сделать близоруким, поместив перед ним достаточно сильную положительную линзу. В работе врачу помогает скиаскопическая линейка с иабором линз. Обычно врач помещает свой глаз иа фиксированном, привычном для него расстоянии, например 80 см, а к глазу пациента подносит скиаскопическую линейку, и, перемещая ее движок, меняет линзы в ней, пока не добьется остановки тени. Аметропия пациента равна алгебраической сумме рефракции линзы и величины, обратной расстоянию между глазами врача и пациента (при расстоянии 80 см добавка равна —1,25 дптр).

В случае астигматического глаза скиаскопия усложняется, но существуют приемы достаточно точного определения и астигматизма и главных меридианов скиаскопическим методом.

Скиаскопию и измерение с помощью глазного рефрактометра называют объективными методами в том смысле, что они не требуют обращения с вопросами к пациенту. Но и эти методы зависят от ощущений и оценок врача. Недавно появились приборы, в которых аметропия и астигматизм измеряются вполне объективно, без влияния оценок как пациента, так и врача. Создано несколько моделей автоматических глазных рефрактометров, как, например, офтальметрон фирмы «Бауш и Ломб» (США) и диоптрон фирмы «Когерент Радиешн» (США).

В автоматических глазных рефрактометрах глаз врача заменен фотоэлементом, а мозг — вычислительным устройством. Проведя измерения, прибор выдает результат либо в виде графика зависимости аметропии от меридиана, либо сразу печатает рецепт на очковую линзу. Однако такой рецепт необходимо проверить субъективной пробой.

Очки, исправляющие аметропию, называют обычно очками для дали. Однако не всегда коррекция зрения очками дает хорошие результаты. Так, например, иногда вследствие травмы или болезни поврежденная роговица искажает форму световой волны так, что на сетчатке появляется неправильное, размытое изображение предметов. Здесь может помочь применение контактных линз.

18. Контактные линзы

Контактная линза насаживается прямо на роговицу глаза пациента. Та поверхность линзы, которая обращена к глазу, соответствует форме роговицы. Зазор между роговицей и линзой заполняется слезной жидкостью, благодаря чему обе поверхности в оптическом смысле почти перестают существовать: свет проходит сквозь них без преломления, отражения и рассеяния. Внешней поверхности линзы придается форма, обеспечивающая исправление аметропии глаза. В результате острота зрения полностью восстанавливается.

Особенно незаменимы контактные линзы при большом различии в аметропии обоих глаз. После удаления хрусталика (снятие катаракты) гиперметропия оперированного глаза увеличивается на 10—12 диоптрий. При коррекции аметропии очковыми линзами на сетчатке обоих глаз получаются четкие изображения предмета, но масштаб этих изображений различен. Неравенство изображений в глазах называют анизэйконией. Если она велика, человек вообще не может слить двух изображений в один образ. При меньшей анизэйконии изображения удается слить, но с известным напряжением, которое может вызвать усталость, головную боль и т. п. Контактная линза ставится хотя и не на место удаленного хрусталика, но значительно ближе к тому месту, где

он находился. Поэтому замена хрусталика контактной линзой вносит во всю систему глаза гораздо меньшее искажение, чем очковая линза и, следовательно, меньше меняет масштаб изображения.

Контактные линзы полезны для работников некоторых профессий, для которых очки неудобны, хороши они в косметическом отношении. Однако далеко не все хорошо переносят контактные линзы. Мало кто способен носить их целый день без перерыва.

Назначение контактной линзы требует точного определения формы роговицы. Давно существует прибор — кератометр, позволяющий определять радиус кривизны роговицы в любом меридиане [45]. Однако кератометр дает только среднее значение радиуса, а он, как правило, различен в разных точках роговицы даже в одном меридиане. Кроме того, нередко встречаются местные особенности формы роговицы. Поэтому для ее исследования пришлось создавать специальные приборы. В 1978 г. появилась отечественная модель такого прибора — фотокератометра.

Основная часть фотокератометра — фотокамера, объектив которой окружен кольцевой лампой-вспышкой. На сферической поверхности, диаметр которой совпадает с осью объектива, закреплен ряд концентрических отражающих колец. При вспышке лампы они отражаются в роговице глаза пациента и на фотоснимке получается изображение колец. Если бы роговица имела точно сферическую форму, на фотопленке получился бы ряд правильных концентрических окружностей, расстояния между которыми позволили бы определить радиус роговицы. В действительности же часто получаются не окружности, а более сложные кривые, расстояния между которыми в разных местах различны. Промер фотографии и дальнейшие расчеты позволяют определить форму роговицы с точностью, необходимой для назначения контактной линзы.

19. Пресбиопия

До сих пор мы связывали очки только с аметропией. Но и эмметропу, когда он начинает приближаться к пятидесяти годам, требуются очки. С возрастом неизбежно и монотонно сокращается объем аккомодации. На рис. 15 изображена усредненная зависимость объема аккомодации от возраста. По оси абсцисс отложен возраст в годах, по оси ординат слева — объем аккомодации в диоптриях, справа — расстояние до ближайшей точки для эмметропа. На графике выделен возраст, в котором эмметропу следует заводить очки для работы. В справочнике по офтальмологии [45] приведена формула оптической силы очков, которые следует назначать человеку, возраст которого в годах выражается числом T, а аметропия которого A_R:

$$A_{\text{п}} = A_R + \frac{T - 30}{10}. \qquad (25)$$

Очки для работы в рецептах врачей называются очками для близи. Значительная потеря объема аккомодации, приводящая к необходимости работать в очках, называется пресбиопией, т. е. старческим зрением. Часто применяемое название «старческая дальнозоркость» неверно, так как улучшения видимости далеких предметов у пожилых людей не происходит.

Для измерения объема аккомодации создан специальный прибор, серийно выпускаемый в СССР,— аккомодометр. Это портативный настольный прибор. Тест-объект помещается в фокальную плоскость линзы, служащей коллиматором. Пациент смотрит одним глазом (другой закрыт заслонкой) и говорит, какую строку тестовой таблицы он различает. Таким образом определяют его остроту зрения для удаленных объектов (тест-объект в фокальной плоскости коллиматора). Смещая затем объект в одну или другую стороны из фокальной плоскости, находят два положения, в которых острота зрения близка к максимальной, т. е. определяют расстояния до дальнейшей и ближайшей точек. Разность обратных величин дает объем аккомодации в диоптриях. Перед глазом пациента могут быть установлены пробные стекла, в частности астигматические, что позволяет назначать очки методом подбора. Таким образом аккомодометр применяется для быстрого определения остроты зрения, для измерения аметропии и назначения очков как для дали, так и для близи. Очки для близи с помощью аккомодометра назначаются более обоснованно, чем по формуле (25), которая базируется на статистических данных и не учитывает индивидуальных особенностей пациента.

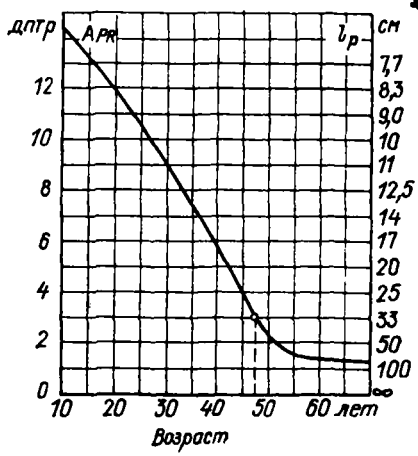


Рис. 15. Зависимость объема аккомодации A_{PR} и расстояния до ближайшей точки l_p от возраста

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

СЕТЧАТКА

20. Анатомия сетчатки

Фоторецепция, т. е. восприятие света и переработка его энергии в другие виды энергии — химическую и электрическую, происходит в сетчатке.

Уже более ста лет тому назад было установлено, что в сетчатке имеются два вида фоторецепторов — палочки и колбочки (рис. 16). Палочки очень чувствительны к свету, но не различают цветов. Цветовое зрение обеспечивают колбочки. Строение сетчатки чрезвычайно сложно [22]. Обычно в ней различают десять слоев, схематически изображенных на рис. 17.

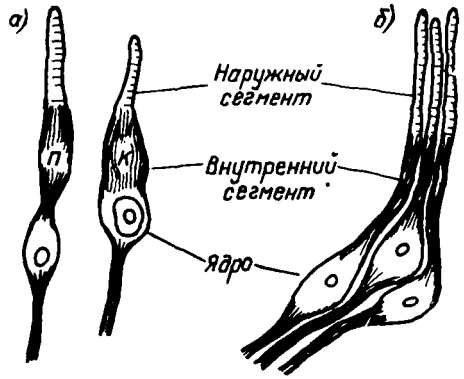


Рис. 16. Схематическое изображение рецепторных клеток сетчатки: *а* — периферические палочки (*П*) и периферические колбочки (*К*); *б* — фовеальные колбочки

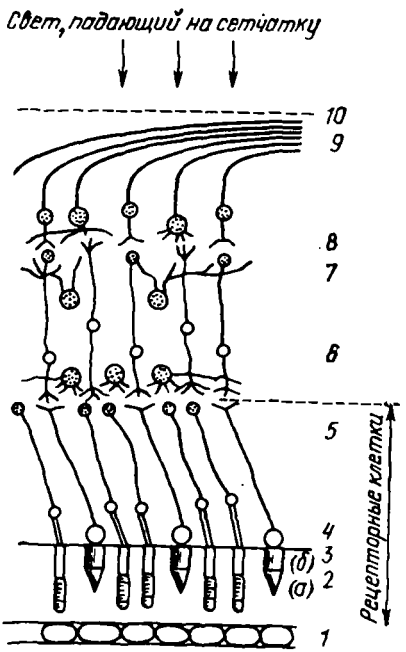


Рис. 17. Схема строения сетчатки

Зрачок нужно представить себе лежащим где-то выше рисунка, так что свет идет сверху вниз. К слою рецепторных клеток — палочек и колбочек (слой *2*) свет доходит сквозь 8 прозрачных слоев, от десятого до третьего. В них происходит первичная обработка информации. После прохождения биологической мембраны (слой *10*) свет последовательно проходит сквозь волокна зрительного нерва *9*, ганглиозные клетки *8*. Далее следуют аксоны биполяров и внутренний ядерный слой *6*, *7*, ножки колбочек и сферулы палочек *5*, ядра рецепторных клеток *4* и наружная пограничная мембрана *3*. Активное поглощение света, приводящее к возникновению нервных импульсов, начинается в сегментах рецепторов, отмеченных буквой *а*, куда свет поступает, пройдя по волноводам *б*. Остатки ненужного более света, предупреждая его рассеяние, поглощает пигментный эпителий (слой *1*).

Возбуждение в виде электрического и химического воздействия идет в обратном направлении: по аксонам, т. е. удлиненным проводящим отросткам, оно передается во внутренний ядерный слой, сложным образом распределяется и перерабатывается горизонтальными и амакриновыми клетками. Горизонтальные клетки осуществляют латеральные, т. е. боковые, связи рецепторов, объединение их друг с другом. Амакриновые клетки (клетки, не имеющие аксонов) тоже как-то участвуют в переработке информации. Биполярные клетки соединяются с

ганглиозными, длинные аксоны которых образуют волокна зрительного нерва, по этим волокнам сигналы передаются в мозг.

Палочки и колбочки распределены по сетчатке очень неравномерно. На периферии преобладают палочки, а в центральной части — колбочки. Центральную часть сетчатки называют макулярной областью или просто макулой. Название произошло от латинского слова macula — пятно. Присутствие макулярного пигмента придает макуле желтоватый цвет, что объясняет ее русское название — желтое пятно.

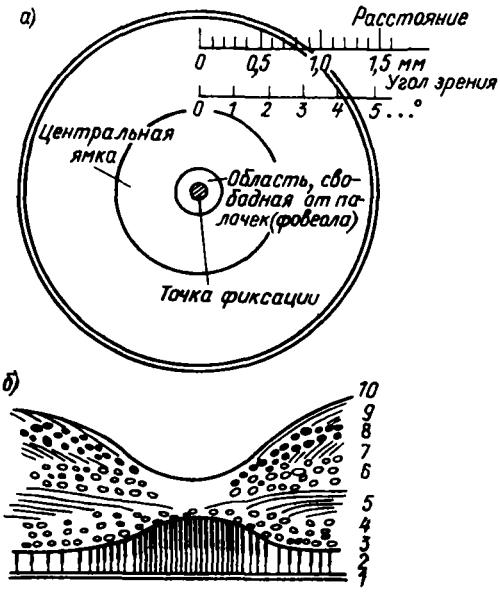


Рис. 18. Схема строения желтого пятна: *а* — размеры различных областей его, *б* — разрез центральной ямки

Желтое пятно имеет овальную форму, оно несколько вытянуто в горизонтальном направлении. Размер его точно не установлен: различные авторы указывают размер по горизонтали от 1,5 до 3 мм, что соответствует угловым размерам от 5 до 10°. По-видимому, возможны большие индивидуальные различия в размере желтого пятна. В середине желтого пятна расположена центральная ямка, или фовеа (по латыни fovea centralis), с поперечником примерно 0,4 мм, что соответствует углу 1,2° в пространстве предметов, см. формулу (12). Схематически сечение фовеа меридиональной плоскостью изображено на рис. 18, *б*. Числа слева указывают те же слои, что и на рис. 17. Почти все слои сильно истончены, что и обусловило углубление в сетчатке — ямку. Тот предмет, который человек хочет особенно внимательно рассмотреть, проецируется на середину центральной ямки. Тут лежит точка фиксации, т. е. точка, через которую проходит зрительная ось.

В центральной ямке, в непосредственной близости к точке фиксации, тесно прижаты друг к другу колбочки и только колбочки — палочек здесь нет. Колбочки здесь особенно тонкие (см. рис. 16, *б*). Поперечный размер наружного сегмента фовеальной колбочки 2 мкм, т. е. меньше половины минуты в угловой мере. По-видимому, каждая фовеальная колбочка через биполярную клетку связана со своим волокном зрительного нерва, которое передает в мозг только ее сигналы. Такое устройство фовеа обеспечивает высокую разрешающую способность центральной

ямки. Периферические колбочки раза в три толще фовеальных и уже не имеют индивидуального представительства в мозгу, так же как и палочки. Это ясно из того, что сетчатка человека содержит около 120 млн. палочек и 7 млн. колбочек, а волокон зрительного нерва от глаза отходит только около миллиона. Группы рецепторов в сетчатке объединяются в рецепторные поля, посылая один общий сигнал по волокну зрительного нерва. Объединение импульсов, их переработка и выработка единого сигнала в виде нескольких нервных импульсов происходит в основном во внутреннем ядерном слое.

На квадратный миллиметр сетчатки приходится примерно 160 тыс. рецепторов. В центральной ямке, свободной от палочек, находится приблизительно 25 тыс. колбочек.

21. Пигменты сетчатки

Роль пигментного слоя — первого, считая от склеры, сводится, очевидно, к тому, чтобы поглотить свет, прошедший уже остальные 9 слоев, и избавить сетчатку от засветки лишним рассеянным светом. С той же целью чернят внутренние стенки биноклей и фотокамер. Восемь слоев сетчатки — от десятого до третьего — в высокой степени прозрачны. Но во втором слое — в рецепторах должно происходить значительное поглощение света, без чего невозможна фотореакция — превращение энергии света в энергию нервного возбуждения. Значит, в палочках и колбочках должны присутствовать поглощающие свет пигменты. В палочках действительно найден такой пигмент — родопсин, или зрительный пурпур [48]. Это сложное белковое вещество. Изучен его состав. Спектр поглощения зрительного пурпура исследован как в извлеченном состоянии (in vitro), так и в живом глазу (in vivo). Поскольку палочки чувствительны только к свету, а цвета не различают, для них достаточно одного светочувствительного вещества. В колбочках в соответствии с принятыми колориметрическими представлениями (см. § 83) следовало бы предположить наличие трех пигментов, отличающихся по спектральному поглощению. Однако до сих пор из колбочек сетчатки человека или обезьяны не удалось выделить ни одного пигмента. Если такие пигменты и существуют, то, по-видимому, в концентрации гораздо меньшей, чем концентрация родопсина. Кроме того, выделить пигмент колбочек из сетчатки труднее потому, что колбочек в 17 раз меньше, чем палочек. Но существуют животные только с колбочковым зрением, например куры. Они очень плохо видят в сумерках (куриная слепота), их сетчатка лишена родопсина. И вот из их сетчатки удалось выделить колбочковое светочувствительное вещество — иодопсин. Но спектральная кривая его поглощения совершенно не согласуется со спектральными свойствами колбочек. Чрезвычайно тонкими

спектрофотометрическими опытами с сетчаткой человека и человекообразных обезьян удалось нащупать микроучастки с кривыми поглощения, которые могли бы обеспечить цветовое зрение. Так появилась принятая сейчас многими учеными гипотеза о трех видах колбочек, каждый из которых чувствителен в своей области спектра. Можно предполагать в сетчатке четыре рода рецепторов: палочки и три вида колбочек — «красные», «зеленые» и «синие». Есть, однако, аргументы и в пользу того, что в каждой фовеальной колбочке присутствуют все три пигмента. Быть может, они по-разному локализованы в колбочке. Вообще механизмы, обеспечивающие цветовое зрение, еще далеко не выяснены, в силу чего кроме гипотезы трех видов колбочек существуют и другие конкурирующие предположения, связанные или с геометрией колбочек, или с инерционными свойствами приемников.

22. Строение колбочки

Строение колбочки весьма сложно. Она представляет собой волновод, направляющий и преобразующий световую волну. На колбочку сильно действуют лучи, идущие по ее оси или близко к оси, что объясняет так называемый эффект Стайлса — Кроуфорда [59]. Стайлс и Кроуфорд показали, что один и тот же узкий пучок света воспринимается как менее яркий, когда он проходит через край зрачка, а не через его центр. Так как именно крайние лучи обусловливают сферическую аберрацию, строение колбочки помогает ослабить вредное действие этой аберрации.

23. Форма и кровоснабжение сетчатки

Вогнутость поверхности сетчатки почти полностью компенсирует кривизну поля оптической системы глаза. Форму сетчатки, как и всего глазного яблока, поддерживает давление стекловидного тела. В норме внутриглазное давление не превышает 27 мм рт. ст. (3,6 кПа). Давление 28 мм и выше служит симптомом весьма часто встречающейся глазной болезни — глаукомы [45].

Сетчатка обильно снабжается кровью с помощью крупных и мелких сосудов, хорошо видимых на ее поверхности в офтальмоскоп. Поскольку в организме человека нет другого места, где сосуды так хорошо просматриваются в интактном органе, офтальмоскопирование может служить для диагностики не только глазных, но и многих других болезней, прежде всего сосудистых заболеваний.

СВЕТОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

24. Основы фотометрии

Основное свойство рецепторов сетчатки — световая чувствительность, т. е. способность, поглощая свет, инициировать первую ступень сложного зрительного процесса. Чувствительность фоторецепторов к свету чрезвычайно велика: рецептор способен генерировать импульс возбуждения при поглощении всего нескольких, быть может только двух, фотонов [5, 38, 42]. Но вероятность того, что фотон будет поглощен светочувствительным веществом рецептора, в сильной степени зависит от энергии фотона, т. е. от частоты или длины волны излучения. Зависимость вероятности поглощения фотона от длины его волны лежит в основе световой фотометрии, обуславливая способ пересчета энергетических величин в световые, прежде всего мощности излучения P (Вт) в световой поток Ф (лм). Первые фотометрические измерения, еще в XVIII в. [22] проводились при достаточной освещенности, когда хорошо различаются цвета, т. е. когда работают колбочки. Поэтому основные фотометрические величины были установлены для дневного, колбочкового зрения. В основу была положена единица силы света — свеча. Сначала это была просто свеча типа восковой или стеариновой, потом старались обусловить материал и диаметр свечи, затем воспроизводили эталон в виде пламенной лампы с определенными конструкционными ее параметрами (свеча Гефнера). В двадцатом веке световые эталоны были созданы в виде ламп накаливания. Во второй половине нашего столетия в основу эталона силы света было положено излучение чериого тела при температуре затвердевания платины. Сила света одного квадратного сантиметра черного тела при температуре 2042 К принята равной 60 свечам или по современной терминологии 60 канделам (60 кд) [34]. Устройство первичного светового эталона достаточно сложно.

В целях его лучшей сохранности и упрощения поверочных испытаний создают вторичные и рабочие световые эталоны. Их изготовляют из специально отобранных и отожженных ламп накаливания. Прямым сравнением с первичным эталоном определяют световые характеристики вторичных эталонов, по которым поверяют рабочие эталоны. В практике лабораторных фотометрических измерений пользуются образцовыми светоизмерительными лампами, которые время от времени сравнивают с рабочими эталонами, хранящимися в метрологических учреждениях. Схема сравнения с первичным эталоном изображена на рис. 19. Кварцевый сосуд *2* засыпан окисью тория *1*, в которую погружен тигель *4* с трубкой *5* из плавленой окиси тория. Тигель наполнен химически чистой платиной *3*, поддерживаемой при температуре 2042 К. Излучение выходит из печи через смотровое окно *6*

и с помощью призмы *7* и объектива *8* через диафрагму *9* направляется на пластинку *10*, которая освещается с другой стороны вторичным эталоном в виде лампы накаливания *11*. Свет, рассеянный обеими сторонами пластинки, направляется в фотометрический кубик *12*. Смотря на него в окуляр, наблюдатель видит

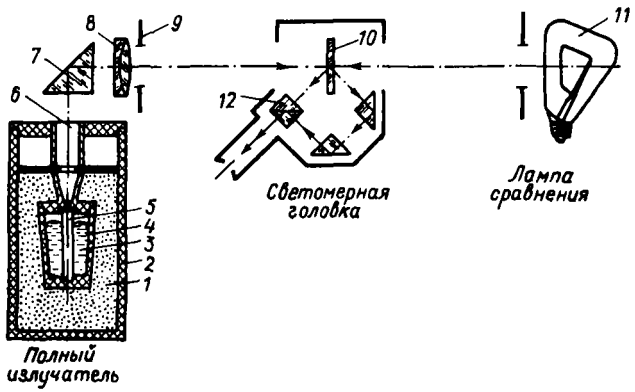


Рис. 19. Сравнение силы света лампы накаливании с эталоном

картину, изображенную на рис. 20. Поля, обозначенные буквой *Э*, освещены светом первичного эталона, а буквой *Л* — лампы накаливания. Передвигая лампу *11*, наблюдатель на некотором расстоянии *l* между пластинкой *10* и лампой *11* добивается одинаковой яркости полей. Яркости обеих сторон пластинки пропорциональны их освещенностям, а так как материал и обработка обеих сторон пластинки одинаковы, коэффициенты пропорциональности между яркостью и освещенностью в обоих случаях равны. Поэтому можно написать уравнение

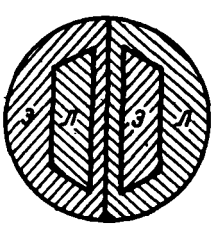


Рис. 20. Распределение яркости, создаваемое фотометрическим кубиком

$$aJ_э = \frac{J_л}{l^2}\tau_c, \qquad (26)$$

где $J_э$ и $J_л$ — сила света первичного и вторичного эталонов; коэффициент a учитывает преобразование пучка света от первичного эталона объективом *8* и потери в призме *7* и объективе *8*; τ_c — коэффициент пропускания системы двух призм фотометра, сквозь которые свет проходит после рассеяния на пластинке *10*.

Таким образом, можно найти силу вторичного эталона

$$J_л = \frac{a}{\tau_c} l^2 J_э. \qquad (27)$$

Следует обратить внимание на то, что хотя здесь измеряется сила света, непосредственно в фотометре уравниваются яркости

двух полей. Силу света получают уже путем расчета. Это обстоятельство характерно для всей визуальной фотометрии: глаз может сравнивать только яркости * и при измерениях работает как нуль-прибор. Равенство яркостей в хороших условиях мы можем устанавливать с большой точностью, с погрешностью меньшей одного процента [16]. Но попытки определить, во сколько раз одна яркость превосходит другую, приводят к очень большим ошибкам.

Положив в основу световых величин силу света и установив ее единицу — канделу, мы можем дальше строить всю систему фотометрических световых величин и единиц. Единица светового потока — люмен. Равномерный точечный источник с силой света 1 кд излучает в телесном угле 1 ср световой поток 1 лм. Между силой света J и потоком Φ источника в этом случае существует соотношение

$$\Phi = 4\pi J. \tag{28}$$

Освещенность измеряется потоком, приходящимся на единицу площади:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\sigma}. \tag{29}$$

Единица освещенности — люкс (лк), равный одному люмену, приходящемуся на квадратный метр, лм/м^2.

Яркость светящейся поверхности в направлении нормали к ней измеряется отношением силы света этой поверхности к ее площади **.

$$L = \frac{\Delta J}{\Delta\sigma}. \tag{30}$$

Освещенный белый экран, обладающий равномерно-диффузным отражением с коэффициентом отражения ρ, приобретает яркость, которую можно подсчитать по формуле

$$L = \frac{\rho}{\pi} E. \tag{31}$$

25. Спектральная чувствительность

В быту мы оцениваем силу света источника по его мощности. Мы знаем, что стоваттная лампочка дает больше света, чем двадцатипятиваттная. Но оценка силы света по мощности возможна только для источников одного типа. Электроплитка с открытой спиралью тоже светит. Но каждый знает, что шестисотваттная плитка светит гораздо хуже, чем двадцатипятиваттная лампочка.

---

* Исключение составляет звездный фотометр, в котором уравниваются освещенности на зрачке от двух точечных источников света.

** В более общем случае, когда поверхность $\Delta\sigma$ наблюдается под углом α к ее нормали, формула (30) приобретает вид $L = \frac{\Delta J}{\Delta\sigma \cos\alpha}$.

Из-за низкой температуры плитки почти всю энергию она излучает в инфракрасной области и только немного — в длинноволновом диапазоне видимых лучей. И все же можно сказать, что световой поток источника пропорционален его мощности, но коэффициент пропорциональности зависит от спектрального состава излучения. Чтобы внести ясность в соотношение между световым потоком и мощностью, нужно обратиться сначала к монохроматическим излучениям, т. е. к излучениям, длины волн которых заключены в узком интервале $d\lambda$. Тогда мы сможем написать формулу

$$d\Phi = K_m V(\lambda) P_\lambda d\lambda, \tag{32}$$

где $d\Phi$ — световой поток, приходящийся на узкую спектральную область $d\lambda$; P_λ — спектральная плотность мощности, т. е. $dP/d\lambda$; K_m — максимальная спектральная световая эффективность, равная 683 лм/Вт; $V(\lambda)$ — относительная спектральная световая эффективность излучения для дневного зрения. Эту безразмерную величину часто называют устарелым, но лаконичным и удобным названием — относительная видность. Эта величина характеризует чувствительность глаза к свету различных длин волн. Каждой длине волны λ соответствует одно значение $V(\lambda)$. Наглядное представление о функции $V(\lambda)$ может дать такая процедура ее определения.

Рядом поставлены два белых экрана, площади которых равны. На первый экран посылают излучение мощностью 1 Вт с длиной волны $\lambda_1 = 555$ нм (желто-зеленый свет), а на второй — другое излучение, скажем зеленое, с длиной волны $\lambda_2 = 500$ нм. Если его мощность будет тоже 1 Вт, мы увидим, что второй экран много темнее первого. Чтобы уравнять яркости, мощность второго излучения придется увеличить до 3 Вт. Значит, чувствительность глаза к излучению λ_2 составляет одну треть чувствительности к излучению λ_1. Приняв чувствительность к $\lambda_1 = 555$ нм (она максимальна) за единицу, получим, что чувствительность к свету с длиной волны $\lambda_2 = 500$ нм равна 1/3 (точное значение $V(\lambda) = 0{,}323$). Таким же образом мы можем найти $V(\lambda)$ для всех других длин волн и получить зависимость $V(\lambda)$ в виде таблицы или графика. Можно найти и значение коэффициента K_m. Мощность излучения, лежащего в узком интервале длин волн $\Delta\lambda$, выразим в виде

$$\Delta P = P_\lambda \Delta\lambda, \tag{33}$$

а соответствующий световой поток будет

$$\Delta\Phi = K_m V(\lambda) \Delta P. \tag{34}$$

Послав этот поток на экран площадью $\Delta\sigma$, обладающий свойствами, обеспечивающими выполнение равенства (31), получим его яркость, воспользовавшись формулами (29), (31) и (34):

$$L = \frac{\rho}{\pi} \frac{K_m V(\lambda) \Delta P}{\Delta\sigma}. \tag{35}$$

Если теперь непосредственно измерить L, то в формуле (35) будут известны все величины, кроме K_m, откуда

$$K_m = \frac{\pi}{\rho} \frac{\Delta\sigma}{\Delta P} \frac{L}{V(\lambda)}. \qquad (36)$$

В действительности определение $V(\lambda)$ и K_m — весьма сложная задача, во-первых, в силу необходимости производить гетерохромное фотометрирование, т. е. уравнивать по яркости поля разного цвета, а во вторых, из-за индивидуальных различий в спектральной чувствительности.

На основе анализа экспериментальных работ [16] Международная комиссия по освещению утвердила значения относительной спектральной эффективности для стандартного фотометрического наблюдателя МКО [34]. На базе этих значений построена основная система фотометрирования. На основе утвержденных МКО значений $V(\lambda)$ построена кривая, изображенная на рис. 21 (сплошная линия).

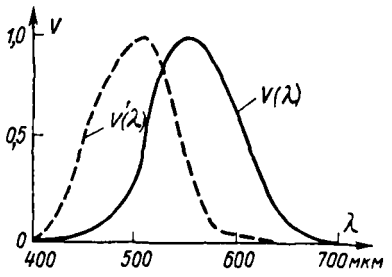


Рис. 21. График функции $V(\lambda)$

Подведем некоторые итоги. Свет, как всякий материальный объект, обладает массой и энергией. Поэтому фотометрию можно строить как учение об энергии света, кладя в основу мощность излучения. Такая фотометрия действительно существует, и ею рассматриваются чисто энергетические величины: энергетическая сила света, мощность или поток излучения, энергетическая освещенность, энергетическая яркость. Для измерений в области энергетической фотометрии лучше всего подходят неселективные приемники, прежде всего тепловые, обращающие в тепловую энергию излучения любой длины волны. Но для такой важной отрасли науки и практической деятельности, как светотехника, чисто энергетическая фотометрия неудобна. Для светотехники важно учитывать воздействие света на селективный приемник — глаз человека. Так, еще раньше энергетической фотометрии появилась ее частная отрасль — визуальная фотометрия с системой световых единиц — световой поток, освещенность, яркость.

Световой поток — это мощность излучения, оцениваемая по ее действию на глаз. Следует еще добавить — на глаз, адаптированный к высоким уровням яркости, когда приемником света служат колбочки (дневное зрение). Можно подумать, что в световые величины вводится элемент субъективности. Оценка по действию на глаз... На чей глаз? Однако после регламентации значений функции относительной видности субъективность исчезает.

Световой поток (а следовательно, и все другие световые величины) становится объективной физической величиной, определяемой формулой (32) и стандартизованными значениями $V(\lambda)$ и K_m*. Чтобы от спектрального потока в интервале длин волн $d\lambda$ перейти к потоку Φ, следует проинтегрировать (32) в пределах от нуля до бесконечности:

$$\Phi = K_m \int_0^\infty P_\lambda V(\lambda)\, d\lambda. \qquad (37)$$

Интеграл всегда сходится, так как вне сравнительно узкой области видимого спектра $V(\lambda) = 0$. Практически вполне достаточно брать интеграл в пределах от 380 до 760 нм.

Если бы фотометрия строилась не исторически, а логически, формулы ее можно было бы упростить. Первоначальная независимость визуальной фотометрии от энергетики вызвала необходимость введения коэффициента K_m, который позднее пришлось определять экспериментально. Можно было бы положить $K_m = 1$, это упростило бы соотношения между энергетическими и световыми величинами.

26. Эффект Пуркинье

При значительном понижении уровня яркости, с наступлением ночи восприятие света переходит к палочкам, спектральная чувствительность которых сильно отличается от чувствительности колбочек. На связанное с таким различием явление более полутораста лет тому назад обратил внимание чешский ученый, доктор и профессор медицины Ян Пуркинье [22]. Эффект Пуркинье заключается в том, что в сумерках предметы красного цвета становятся темнее синих, а зеленые становятся синеватыми, так как теряют желтую составляющую их цвета. Ночью, когда цвета уже совсем не различаются, алая роза кажется темнее василька.

Уже сам Пуркинье дал в общих чертах правильное объяснение открытому им явлению. Гельмгольц получил уже некоторые количественные результаты, характеризующие смещение максимума спектральной чувствительности в сторону более коротких волн при понижении яркости.

Хотя изучению явлений, связанных с эффектом Пуркинье, посвящено довольно много работ (хороший обзор их дан в книге А. А. Волькенштейна [9]), долгое время казалось, что они представляют интерес только для физиологов. Считалось, что активная деятельность человека при малых яркостях составляет по времени примерно сотую часть всей работы человека. Однако Бертлинг справедливо заметил, что хотя чаще всего работает светлоадаптированный глаз, те более редкие случаи, когда приходится полагаться на ночное или сумеречное зрение, бывают наиболее критическими, так что ошибка в расчете освещения может иметь роковые последствия. В тридцатых годах нашего столетия возникли новые задачи освещения наружных пространств газосветными лампами, в связи с чем стала очевидной необходимость уточнения светотехнических расчетов в области малых освещенностей. В начале столетия к увеличению экономичности ламп накаливания был один

* По новому, международно принятому определению [34] световой поток — это лучистый поток, оцениваемый по его действию на селективный приемник, спектральная чувствительность которого определяется нормализованной функцией относительной спектральной световой эффективности излучения $V(\lambda)$. Новое определение подчеркивает физическую сущность величины.

основной путь — увеличение температуры нити ламп. Это было выгодно для светлоадаптированного глаза и тем более для темноадаптированного. Появление газосветных и люминесцентных ламп разорвало термодинамическую связь между температурой и спектром излучения. Получили распространение, например, натриевые лампы, отличающиеся большой световой отдачей. Однако, в силу эффекта Пуркинье это их преимущество теряет силу при освещенностях в доли люкса. Еще Бертлинг сравнил экономичность нескольких ламп при высокой и низкой освещенности, в частности натриевой и ртутной ламп, световая отдача которых при высокой освещенности составляла соответственно 51 и 33 лм/Вт. Оказалось, что при низкой освещенности натриевая лампа дает в 6 раз меньше света на ватт потребляемой мощности, чем ртутная

Изучению работы зрения при низких освещенностях и связанных с этим фотометрических и светотехнических вопросов посвятили свои работы многие ученые, как советские, так и зарубежные. Назовем имена хотя бы некоторых из них: С. О. Майзель, А. А. Гершуи, Н. И. Пинегин, В. Г. Самсонова, С. Г. Юров, А. А. Волькенштейн [9], Боума, Стайлс, Киинн [26], Кроуфорд, Уолд.

В результате Международной комиссией по освещению была стандартизована относительная спектральная световая эффективность излучения для ночного зрения $V'(\lambda)$ [34], кривая которой проведена на рис. 21 штриховой линией. Максимум $V'(\lambda)$ приходится на длину волны 507 нм.

Международный светотехнический словарь рекомендует считать дневным (фотопическим) зрением работу глаза, адаптированного к уровням яркости по меньшей мере в несколько кд/м², а ночным (скотопическим) — работу глаза, адаптированного к яркостям, меньшим нескольких сотых кд/м².

27. Эквивалентная яркость

При фотопическом зрении работают только колбочки, при скотопическом — только палочки. Однако остается еще несколько порядков значений яркости, при которой в зрительном процессе участвуют и колбочки, и палочки. Это область сумеречного (мезопического) зрения. Пришлось исследовать функции видности и в промежуточной зоне. В табл. 4 приведены восемь функций видности [9] в интервале яркости 10^{-5} кд/м² — до 100 кд/м².

Таблица 4. **Относительная спектральная световая эффективность излучения $V(\lambda)$ в зависимости от яркости адаптации**

Длина волны	Значения $V(\lambda)$ при яркости адаптации, кд/м²							
	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	100
400		$9{,}29 \cdot 10^{-3}$		$9{,}29 \cdot 10^{-3}$	0,002	$7 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$
420		0,097		0,097	0,022	0,008	0,006	0,004
440		0,328		0,310	0,087	0,031	0,027	0,023
460		0,567		0,510	0,240	0,077	0,068	0,060
480		0,793		0,710	0,480	0,180	0,160	0,139
500		0,982		0,900	0,750	0,430	0,370	0,323
520		0,935		0,995	0,960	0,810	0,760	0,710
540	0,650	0,650	0,680	0,890	0,985	0,984	0,970	0,954
560	0,329	0,350	0,370	0,600	0,860	0,970	0,987	0,995
580	0,121	0,130	0,180	0,330	0,590	0,810	0,840	0,870
600	$3{,}31 \cdot 10^{-2}$	0,043	0,076	0,170	0,320	0,550	0,590	0,631
620	$7{,}37 \cdot 10^{-3}$	0,013	0,029	0,068	0,150	0,310	0,350	0,381
640	$1{,}50 \cdot 10^{-3}$	$3{,}9 \cdot 10^{-3}$	0,010	0,026	0,055	0,130	0,150	0,175
660	$3{,}13 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$2{,}4 \cdot 10^{-3}$	$6{,}3 \cdot 10^{-3}$	0,019	0,042	0,056	0,061
680	$7{,}15 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1{,}6 \cdot 10^{-3}$	0,004	0,011	0,014	0,017
700	$1{,}78 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	0,001	$2{,}7 \cdot 10^{-3}$	$3{,}3 \cdot 10^{-3}$	0,004

После того как была обнаружена зависимость спектральной чувствительности от яркости, А. А. Гершун предложил для ее учета кроме стандартной (фотопической) яркости ввести новую величину — эквивалентную яркость L_{eq}. Эта величина официально принята МКО [34], термин 45-10-085

Яркость, выраженную через световой поток, в определение которого входит функция $V(\lambda)$ [формула (36)], называют фотопической или стандартной. Эквивалентную яркость поверхности, освещенной излучением любого спектрального состава, условились измерять, визуально уравнивая ее с яркостью белой поверхности, освещенной излучением черного тела при температуре затвердевания платины (2042 К). Назовем такое излучение эталонным. Создаваемая эталонным излучением стандартная яркость при любых ее уровнях считается численно равной эквивалентной яркости. Для излучения любой иной цветовой температуры это равенство стандартной и эквивалентной яркостей нарушается при низких уровнях освещения, где вступает в силу эффект Пуркинье. Поясним сказанное примером.

Пусть одно поле фотометра — назовем его первым — освещено эталонным излучением, причем освещенность его можно изменять в любое число раз, сохраняя неизменным спектральный состав света. Осветим второе поле лампой накаливания с температурой нити 2800 К и установим на обоих полях фотометра яркость 100 кд/м². Уменьшим теперь освещенность обоих полей в 100 000 раз. Стандартная яркость их станет 10^{-3} кд/м². Но мы ясно увидим, что второе поле светлее первого. Чтобы сделать поля равносветлыми, стандартную яркость первого поля придется увеличить примерно до $1{,}4 \times 10^{-3}$ кд/м². Это и будет эквивалентной яркостью второго поля, стандартная яркость которого равна 10^{-3} кд/м². Разница объясняется тем, что излучение более высокой цветовой температуры, спектр которого сдвинут в сторону коротких волн, меньше проигрывает в светлоте при переходе к палочковому приемнику, максимум чувствительности которого сдвинут в ту же сторону.

Фотометр для измерения эквивалентных яркостей должен иметь большое поле зрения (не меньше 25°) и большой выходной зрачок (не меньше 7,5 мм в диаметре). Поля сравнения лучше делать концентрическими: внутреннее 14°, внешнее до 25—30°. Измерения проводят при установившемся состоянии адаптации.

Система эквивалентных яркостей находит применение в научных исследованиях функций зрения при малоярких цветных полях и в практической светотехнике, например при установлении весьма низких норм цветного (красного) освещения в цехах, производящих или обрабатывающих светочувствительные материалы.

Методы вычисления эквивалентной яркости приведены в книге Волькенштейна [9]. Если источник света можно достаточно точно характеризовать цветовой температурой $T_ц$, применима приближенная формула, предложенная Кинни

$$\lg \frac{L_{eq}}{L} = 0{,}5835 - 1195{,}53 \frac{1}{T_ц}. \qquad (38)$$

28. Пороговая яркость

Абсолютная световая чувствительность глаза характеризуется пороговой яркостью $L_п$. Чем меньше $L_п$, тем больше световая чувствительность $S_с$.

Чему же равна пороговая яркость? Несмотря на многочисленные исследования, ответить на этот вопрос не так легко. Во-первых, из-за того, что $L_п$ сильно зависит от условий наблюдения, например от площади тестового поля. Во-вторых, из-за того, что четкие представления об эквивалентной яркости вошли в фотометрию сравнительно недавно и при использовании литературных данных не всегда известно, какую яркость имел в виду

автор. А если и ясно, что речь идет о стандартной яркости, редко имеется достаточно данных, чтобы пересчитать ее в эквивалентную. Однако порядок величины L_n указать можно. Кинни для поля диаметром 2°, излучающего свет с длиной волны $\lambda = 555$ нм, получил $L_{eq} = 5{,}1 \cdot 10^{-6}$ кд/м^2 (стандартная яркость $L = 2{,}1 \times \times 10^{-6}$ кд/м^2). По данным Лурия для темноадаптированного глаза при больших размерах тестового пятна (от 8 до 100° в диаметре) пороговое значение эквивалентной яркости L_{eq} лежит в пределах от $0{,}3 \cdot 10^{-6}$ до $0{,}7 \cdot 10^{-6}$ кд/м^2.

Можно согласиться с В. В. Мешковым [35] и принять, что пороговая яркость равна одной миллионной кд/м^2. Часто фон с яркостью $L = 10^{-6}$ кд/м^2 считают совершенно темным, полагая, что дальнейшее уменьшение яркости не влияет на функции зрения: даже яркость, на порядок большая, т. е. 10^{-5} кд/м^2, обеспечивает скотопическое зрение, которому соответствует функция $V'(\lambda)$.

При определении пороговой яркости в глаз входит довольно большой световой поток соответственно большой площади тестового поля. Уменьшение поля приводит к уменьшению воспринимаемого потока. Поэтому минимальный световой поток, еще способный вызывать ощущение света, следует определять по наблюдению точечных источников. Если же требуется определить минимальную порцию световой энергии, воспринимаемой зрением, нужно ограничить длительность воздействия света на сетчатку, т. е. наблюдать короткие вспышки точечного источника.

Какой источник считается точечным? Типичный точечный источник — звезда. Диаметры звезд измеряются малыми долями секунды. Однако вследствие дифракции и аберраций на сетчатке звезда изображается пятном с диаметром, не меньшим одной угловой минуты. Поэтому точечным можно считать любой источник, угловой диаметр которого не превышает минуты.

Пока мы имеем дело с протяженными источниками, для глаза важна их яркость, которая в конечном счете определяет освещенность изображения источника на сетчатке E'. В самом деле, пусть источник имеет форму квадрата, сторона которого равна y. Глаз наблюдателя находится на нормали к плоскости квадрата, на расстоянии l от него. Силу света источника в направлении нормали найдем по формуле *

$$J = Ly^2, \tag{39}$$

где L — яркость в направлении нормали. Тогда освещенность E на роговице глаза будет

$$E = Ly^2/l^2, \tag{40}$$

* Точная формула для силы света $J = \int_\sigma L \cos\alpha \, d\sigma$, где σ — площадь источника, α — угол между нормалью и направлением, для которого вычисляется сила света (в нашем случае — к глазу наблюдателя). Если $y \ll l$, то $\cos\alpha = 1$ по всей площади квадрата, при этом $J = L\delta$. Даже если квадрат виден под углом 10°, минимальное значение $\cos\alpha$ отличается от единицы менее, чем на 1%.

а поток, достигший сетчатки

$$\Phi' = \frac{\pi l y^2}{4 l^2} \tau_1 d^2, \tag{41}$$

где $\tau_г$ — коэффициент пропускания глазных сред; d — диаметр зрачка глаза.

Поток Ф осветит на сетчатке площадь σ' (площадь изображения источника), которая равна y'^2. А так как y' по формуле (12) равен $-\alpha f$, то

$$\sigma' = \alpha^2 f^2. \tag{42}$$

Освещенность на сетчатке получим, разделив Φ' на σ' и приняв во внимание, что угловой размер объекта $\alpha = y/l$:

$$E' = \frac{\pi \tau_г d^2}{4 f^2} L. \tag{43}$$

Видим, что в формулу E' не входит расстояние до светящейся поверхности. Объект (самосветящийся или получивший яркость L в результате рассеяния света других источников) кажется нам одинаково ярким на расстоянии и 2, и 5, и 20 м. Яркость протяженного объекта не зависит от его углового размера α.

Но положение меняется, если α становится меньше одной минуты. Здесь теряет смысл формула (42), σ' делается практически постоянной величиной и освещенность изображения точечного источника оказывается пропорциональной потоку Ф, который в свою очередь пропорционален освещенности E на поверхности зрачка наблюдателя [формула (40)]. Подставив в формулу (40), в числитель силу света J по формуле (39), получим

$$E = J/l^2. \tag{44}$$

Освещенность E, создаваемая точечным источником на зрачке наблюдателя, называется блеском источника. Именно блеск, изменяясь обратно пропорционально квадрату расстояния от источника, определяет видимость звезды. Минимальная освещенность на зрачке, при которой мы еще видим источник, называется пороговым блеском. Будем обозначать пороговый блеск для периферического зрения $E_п$, а для центрального $E_ц$.

Литературные данные [19, 26, 40] хотя и не вполне совпадают, но не расходятся по порядку величины. На основе их анализа мы даем округленные значения порогового блеска в полной темноте, т. е. при яркости фона $L = 10^{-6}$ кд/м² или меньшей, при бинокулярном наблюдении: $E_п = 2 \cdot 10^{-9}$ лк; $E_ц = 2 \cdot 10^{-8}$ лк.

Поскольку колбочки концентрируются в центральной части сетчатки, а палочки преобладают на периферии, $E_ц$ можно считать порогом колбочковой чувствительности, а $E_п$ — палочковой. Случается, что человек, заметив далекий огонь периферическим зрением, поворачивает к нему глаза и теряет его. Астрономы

даже говорят, что для того чтобы видеть слабую звезду, не надо на нее смотреть.

29. Квантовый порог чувствительности

Определим теперь минимальную световую энергию, которая может обусловить зрительное восприятие. Световая энергия Q_v при ее постоянстве во времени выражается произведением светового потока Φ и времени его действия τ:

$$Q_v = \Phi\tau. \tag{45}$$

Пороговое значение световой энергии получим по формуле

$$Q_{v\text{п}} = \Phi_\text{п}\theta, \tag{46}$$

где $\Phi_\text{п}$ — пороговый поток, входящий в глаз при блеске $E_\text{п}$; θ — время инерции зрения, т. е. время, в течение которого глаз суммирует воздействие света (подробно об этом см. гл. 9). При темновой адаптации $\theta = 0{,}2$ с.

Для вычисления $\Phi_\text{п}$ положим, что диаметр зрачка $d = 0{,}8$ см $= 8\cdot10^{-3}$ м, и умножим $E_\text{п}$ на площадь зрачка $\pi d^2/4$. Получим $\Phi_\text{п} = 10^{-13}$ лм и $Q_{v\text{п}} = 2\cdot10^{-14}$ лм·с. Тем же путем получим пороговый поток и пороговую световую энергию для центрального зрения: $\Phi_\text{ц} = 10^{-12}$ лм и $Q_{v\text{ц}} = 2\cdot10^{-13}$ лм·с. Примерно такие же значения $Q_{v\text{п}}$ и $Q_{v\text{ц}}$ мы получим, если будем исходить из данных работы [26], в которых непосредственно определялось произведение $E_\text{ц}\tau$ или $E_\text{п}\tau$ при малых τ.

Оценим энергию $Q_\text{п}$ и $Q_\text{ц}$, входящую в зрачок при пороговом восприятии соответственно периферическим и центральным зрением. Для перехода от световой величины Q_v к энергетической Q умножим обе части формулы (33) на τ и, учитывая, что $\tau\Delta\Phi = \Delta Q_v$, а $\tau\Delta P = \Delta Q$, получим

$$\Delta Q_v = K_m V(\lambda)\,\Delta Q. \tag{47}$$

Будем производить вычисление для монохроматического света с длиной волны λ, соответствующей максимуму спектральной эффективности, т. е. для периферии $\lambda = 507$ нм, а для центрального зрения $\lambda = 555$ нм. Тогда $V(\lambda) = 1$ и мы сможем написать * $Q = Q_v/K_m$. Отсюда $Q_\text{п} = 1{,}5\cdot10^{-17}$ Дж $= 1{,}5\cdot10^{-10}$ эрг; $Q_\text{ц} = 1{,}5\cdot10^{-16}$ Дж $= 1{,}5\cdot10^{-9}$ эрг.

Энергия фотона $q = hc/\lambda$, где h — постоянная Планка, а c — скорость света. Разделив $Q_\text{п}$ и $Q_\text{ц}$ на соответствующие значения q, получим числа фотонов, входящих в зрачок при пороговом восприятии света периферическим и центральным зрением, $n_\text{п} = 39$ и $n_\text{ц} = 424$.

Пропускание глазных сред зависит от длины волны [22]: для $\lambda = 507$ нм $\tau_\text{г} = 0{,}51$; для $\lambda = 555$ нм $\tau_\text{г} = 0{,}57$. Значит, число фотонов, доходящих до сетчатки, $n'_\text{п} = 20$; $n'_\text{ц} = 242$. Только часть дошедших до сетчатки фотонов поглощается молекулами светочувствительного вещества, вызывая их возбуждение. Назовем такое поглощение активным поглощением и введем величину a_i — коэффициент активного поглощения монохроматического света, соответствующего максимуму спектральной световой эффективности. По данным Вавилова [5] при темновой адаптации $a_i = 0{,}22$. Хехт [38] дает несколько меньшее число, Роуз [42] считает, что a_i лежит в пределах от 0,1 до 0,2, т. е. $a_i n'_\text{п} = 2 \div 4$. Итак, чтобы наблюдатель заметил световую вспышку, палочки его сетчатки должны активно поглотить от двух до четырех фотонов. Для колбочек a_i раз в десять меньше, чем для палочек. Но число активно поглощенных фотонов на пороге восприятия и для колбочек, по-видимому, лежит в тех же пределах.

---

* Знак Δ означал некоторую часть спектрального интервала. Теперь мы считаем, что вся энергия сосредоточена в узком спектральном интервале около указанных выше длин волн, и поэтому вместо ΔQ и ΔQ_v можно писать просто Q и Q_v.

АДАПТАЦИЯ

30. Дивпазон воспринимвемых гпазом яркостей

Адаптацией называется перестройка зрительной системы для наилучшего приспособления к данному уровню яркости. Глазу приходится работать при яркостях, меняющихся в чрезвычайно широком диапазоне, примерно от 10^4 до 10^{-6} кд/м^2, т. е. в пределах десяти порядков. При изменении уровня яркости поля зрения автоматически включается целый ряд механизмов, которые и обеспечивают адаптационную перестройку зрения. Если уровень яркости длительное время существенно не меняется, состояние адаптации приходит в соответствие с этим уровнем. В таких случаях можно говорить уже не о процессе адаптации, а о состоянии: адаптации глаза к такой-то яркости L.

При резком изменении яркости происходит разрыв между яркостью и состоянием зрительной системы, разрыв, который и служит сигналом для включения адаптационных механизмов.

В зависимости от знака изменения яркости различают световую адаптацию — перестройку на более высокую яркость и темновую — перестройку на более низкую яркость.

31. Световая адаптация

Световая адаптация протекает значительно быстрее темновой. Выходя из темного помещения на яркий дневной свет, человек бывает ослеплен и в первые секунды почти ничего не видит. Образно выражаясь, зрительный прибор зашкаливает. Но если милливольтметр перегорает при попытке измерить им напряжение в десятки вольт, то глаз отказывается работать только короткое время. Чувствительность его автоматически и достаточно быстро падает. Прежде всего сужается зрачок. Кроме того, под непосредственным действием света выцветает зрительный пурпур палочек, в результате их чувствительность резко падает. Начинают действовать колбочки, которые, по-видимому, оказывают тормозящее действие на палочковый аппарат и выключают его. Наконец, происходит перестройка нервных связей в сетчатке и понижение возбудимости мозговых центров. В результате уже через несколько секунд человек начинает видеть в общих чертах окружающую картину, а минут через пять световая чувствительность его зрения приходит в полное соответствие с окружающей яркостью, что обеспечивает нормальную работу глаза в новых условиях.

Темновая адаптация изучена гораздо лучше, чем световая, что в значительной степени объясняется практической важностью этого процесса. Во многих случаях, когда человек попадает в условия низкой освещенности, важно заранее знать, через сколько времени и что он сможет видеть. Кроме того, нормальное течение темновой адаптации нарушается при некоторых болезнях, и поэтому ее изучение имеет диагностическое значение. Поэтому созданы специальные приборы для исследования темновой адаптации — адаптометры. В Советском Союзе серийно выпускается адаптометр АДМ*. Опишем его устрой-

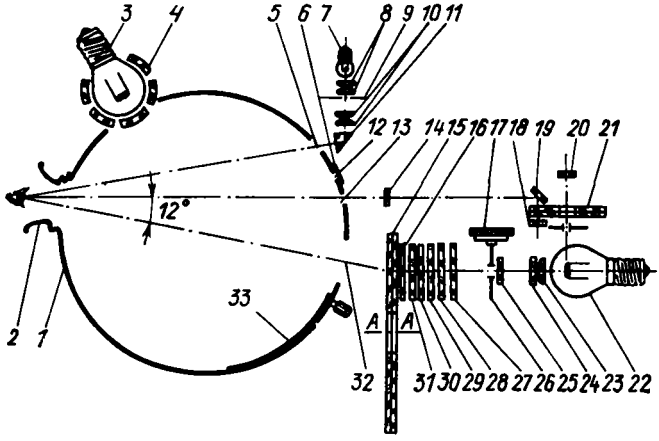


Рис. 22. Схема адаптометра АДМ

ство и метод работы с ним. Оптическая схема прибора изображена на рис. 22, общий вид дан на рис. 23. Пациент прижимает лицо к резиновой полумаске *2* и смотрит обоими глазами внутрь шара *1*, покрытого изнутри белой окисью бария. Через отверстие *12* врач может видеть глаза пациента. С помощью лампы *3* и фильтров *4* стенкам шара можно сообщить яркость L_c, создающую предварительную световую адаптацию, во время которой отверстия шара закрывают заслонками *6* и *33*, белыми с внутренней стороны.

При измерении световой чувствительности лампу *3* выключают и открывают заслонки *6* и *33*. Включают лампу *22* и по изображению на пластинке *20* проверяют центрирование ее нити. Лампа *22* освещает через конденсор *23* и светофильтр дневного света *24* молочное стекло *25*, которое служит вторичным источником света для пластинки из молочного стекла *16*.

* Сейчас подготовляется к серийному выпуску новая, более современная модель адаптометра с автоматической регистрацией результатов измерения.

Часть этой пластинки, видимая пациентом через один из вырезов в диске *15*, служит тест-объектом при измерении пороговой яркости. Регулировка яркости тест-объекта производится ступенями с помощью фильтров *27—31* и плавно с помощью диафрагмы *26*, площадь которой изменяется при вращении барабана *17*. Фильтр *31* имеет оптическую плотность 2, т. е. пропускание 1%, а остальные фильтры — плотность 1,3, т. е. пропускание 5%. Осветитель *7—11* служит для боковой засветки глаз через отверстие *5* при исследовании остроты зрения в условиях ослепления. При снятии кривой адаптации лампа *7* выключена.

Рис. 23. Адаптометр АДМ

Небольшое, прикрытое красным светофильтром отверстие в пластинке *14*, освещаемое лампой *22* с помощью матовой пластинки *18* и зеркальца *19*, служит фиксационной точкой, которую пациент видит через отверстие *13*.

Основная процедура измерения хода темновой адаптации состоит в следующем. В затемненном помещении пациент садится перед адаптометром и смотрит внутрь шара, плотно прижав лицо к полумаске. Врач включает лампу *3*, устаиовив с помощью фильтров *4* яркость $L_c = 38$ кд/м². Пациент адаптируется к этой яркости в течение 10 мин. Установив поворотом диска *15* круглую диафрагму, видимую пациентом под углом 10°, врач по истечении 10 мин гасит лампу *3*, включает лампу *22*, фильтр *31* и открывает отверстие *32*. При полностью открытой диафрагме и фильтре *31* яркость L_1 стекла *16* равна 0,07 кд/м². Пациенту дается указание смотреть на фиксационную точку *14* и сказать «вижу», как только он увидит светлое пятно на месте пластинки *16*. Врач отмечает это время t_1, уменьшает яркость пластинки *16* до значения L_2, ждет, пока пациент снова скажет «вижу», отмечает время t_2 и снова уменьшает яркость. Измерение длится 1 ч после выключения адаптирующей яркости *. Получается ряд значений t_i, каждому из которых соответствует

* Часто измерение ведут иначе. Через каждые 5 мин, медленно увеличивая яркость L, находят то ее значение, при котором пациент начинает видеть круглое отверстие диафрагмы диска *15*.

свое, L_i, что позволяет построить зависимость пороговой яркости $L_п$ или световой чувствительности $S_с$ от времени темновой адаптации t.

Обозначим через L_m максимальную яркость пластинки *16*, т. е. ее яркость при полном раскрытии диафрагмы *26* и при выключенных фильтрах. Суммарное пропускание фильтров и диафрагмы обозначим $\tau_ф$. Оптическая плотность $D_ф$ системы, ослабляющей яркость, равна логарифму обратной ему величины.

$$D_ф = \lg \frac{1}{\tau_ф} = -\lg \tau_ф. \qquad (48)$$

Значит, яркость при введенных ослабителях $L = L_m\tau_ф$, а $\lg L = \lg L_m - D_ф$.

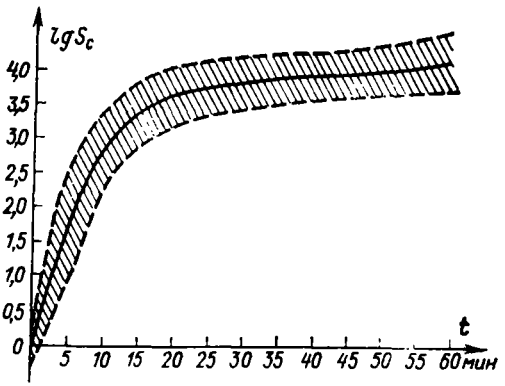


Рис. 24. Нормальный ход зависимости $S_с$ от времени темновой адаптации t

Так как световая чувствительность обратно пропорциональна пороговой яркости, т. е.

$$S_с = 1/L_п, \qquad (49)$$

то

$$\lg S_с = D_ф - \lg L_m. \qquad (50)$$

В адаптометре АДМ $L_m = 7$ кд/м².

В описании адаптометра приведена зависимость D от времени темновой адаптации t, принимаемая врачами за норму. Отклонение хода темновой адаптации от нормы указывает на ряд заболеваний не только глаза, но и всего организма. Приведены средние значения $D_ф$ и допустимые граничные значения, еще не выходящие за пределы нормы. Исходя из значений $D_ф$, мы вычислили по формуле (50) и на рис. 24 приводим зависимость $S_с$ от t в полулогарифмическом масштабе.

Более детальное изучение темновой адаптации указывает на большую сложность этого процесса. Ход кривой зависит от многих факторов: от яркости предварительной засветки глаз $L_с$, от места на сетчатке, на которое

проецируется тест-объект, от его площади и т. д. Не входя в подробности, укажем на различие адаптационных свойств колбочек и палочек. На рис. 25 изображен график уменьшения пороговой яркости, взятый из работы Пинегина. Кривая снята после сильной засветки глаз белым светом с $L_c = 27\,000$ кд/м². Тестовое поле освещалось зеленым светом с $\lambda = 546$ нм, тест-объект размером 20′ проецировался на периферию сетчатки. По оси абсцисс отложено время темновой адаптации t, по оси ординат $\lg (L_п/L_0)$, где L_0 — пороговая яркость в момент $t = 0$, а $L_п$ — в любой другой момент. Мы видим, что примерно за 2 мин чувствительность повышается в 10 раз, а за следующие 8 мин — еще в 6 раз. На 10-й минуте возрастание чувствительно-

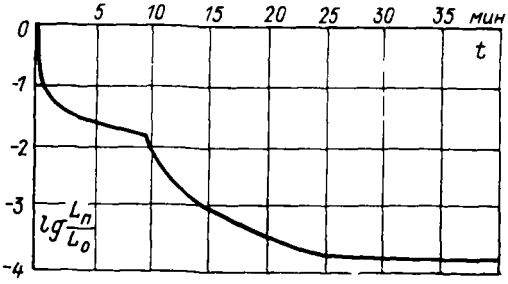


Рис. 25. Кривая темновой адаптации по Н. И. Пинегину

сти опять ускоряется (пороговая яркость уменьшается), а затем снова становится медленным. Объяснение хода кривой такое. Сначала быстро адаптируются колбочки, но они могут повысить чувствительность только примерно в 60 раз. Через 10 мин. адаптации возможности колбочек исчерпаны. Но к этому времени уже расторможены палочки, обеспечивающие дальнейший рост чувствительности.

33. Факторы, повышающие световую чувствительность при адаптации

Раньше, изучая темновую адаптацию, основное значение придавали возрастанию концентрации светочувствительного вещества в рецепторах сетчатки, главным образом родопсина. Академик П. П. Лазарев при построении теории процесса темновой адаптации исходил из допущения, что световая чувствительность S_c пропорциональна концентрации a светочувствительного вещества. Таких же взглядов придерживался и Хехт. Между тем легко показать [25—27], что вклад повышения концентрации в общее увеличение чувствительности не так уж велик.

В § 30 мы указали границы яркостей, при которых приходится работать глазу — от 10^4 до 10^{-6} кд/м². При нижнем пределе пороговую яркость можно считать равной самому пределу $L_п = 10^{-6}$ кд/м². А при верхнем? При высоком уровне адаптации L пороговой яркостью $L_п$ можно назвать минимальную яркость, которую еще можно отличить от полной темноты. Используя экспериментальный материал работы [33], можно сделать вывод, что $L_п$ при высоких яркостях составляет при-

мерно $0{,}006L$. Итак, нужно оценить роль различных факторов при уменьшении пороговой яркости от 60 до 10^{-6} кд/м^2, т. е. в 60 млн. раз. Перечислим эти факторы:

1. Переход от колбочкового зрения к палочковому. Из того, что для точечного источника, когда можно считать, что свет действует на один рецептор, $E_п = 2 \cdot 10^{-9}$ лк, а $E_ц = 2 \cdot 10^{-8}$ лк, можно сделать вывод, что палочка чувствительней колбочки в 10 раз.

2. Расширение зрачка от 2 до 8 мм, т. е. по площади в 16 раз.

3. Увеличение времени инерции зрения [26] от 0,05 до 0,2 с, т. е. в 4 раза.

4. Увеличение площади, по которой производится суммирование воздействия света на сетчатку. При большой яркости угловой предел разрешения $\delta = 0{,}6'$, а при малой $\delta = 50'$. Увеличение этого числа означает, что множество рецепторов объединяется для совместного восприятия света, образуя, как обычно говорят физиологи, одно рецептивное поле (Глезер [48]). Площадь рецептивного поля увеличивается в 6900 раз.

5. Увеличение чувствительности мозговых центров зрения.

6. Увеличение концентрации a светочувствительного вещества. Именно этот фактор мы и хотим оценить.

Допустим, что увеличение чувствительности мозга мало и им можно пренебречь. Тогда мы сможем оценить влияние возрастания a или, по крайней мере, верхний предел возможного увеличения концентрации.

Таким образом, повышение чувствительности, обусловленное только первыми факторами, будет $10 \times 16 \times 4 \times 6900 = 4{,}4 \cdot 10^6$. Теперь можно оценить, во сколько раз чувствительность возрастает из-за увеличения концентрации светочувствительного вещества: $(60 \cdot 10^6)/(4{,}4 \cdot 10)^6 = 13{,}6$, т. е. примерно в 14 раз. Это число невелико по сравнению с 60 миллионами.

Как мы уже упоминали, адаптация — это весьма сложный процесс. Сейчас, не углубляясь в механизм его, мы количественно оценили значимость отдельных его звеньев.

Следует отметить, что ухудшение остроты зрения с падением яркости есть не просто недостаток зрения, а активный процесс, позволяющий при недостатке света видеть в поле зрения хотя бы крупные предметы или детали.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ДВИЖЕНИЕ ГЛАЗ

34. Поле зрения глаз

Глаз — это широкоугольная оптическая система, т. е. система с большим полем зрения. Поле зрения глаза исследуют с помощью приборов, называемых периметрами.

На рис. 26 изображен периметр проекционный ПРП-60, изготовляемый в Советском Союзе. Голова испытуемого фиксируется подбородником *7*. Исследуемый глаз совмещается с центром дуги *6*. Другой глаз прикрывается заслонкой. Испытуемый должен смотреть на фиксационную точку *4*, помещенную в середине дуги *6*. Проектор *3* и поворотное зеркало *5* дают на дуге *6* изображение тест-объекта — овального светлого пятна. Врач, поворачивая зеркало *5* с помощью барабана *1*, смещает тестовое пятно от центра к периферии дуги до тех пор, пока не услышит

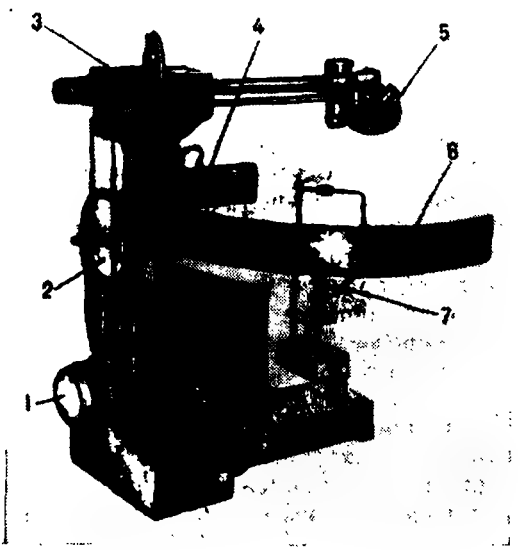


Рис. 26. Периметр проекционный ПРП-60

возгласа испытуемого «не вижу», означающего, что пятно перешло границу его поля зрения. В этот момент врач нажимает на штифт регистрирующего устройства *2* и делает прокол на укрепленном под ним бланке. Такое же измерение делается при отводе тест-объекта в другую сторону по дуге периметра. Затем врач поворачивает дугу вместе с проектором вокруг горизонтальной оси, проходящей через фиксационную точку, и проводит измерения в другом меридиане, потом в третьем и т. д.*.

Поле зрения человека зависит от многих факторов: от яркости, размера и контраста тестовой марки, от ее цвета и т. д. Имеются и значительные индивидуальные различия. Все же можно говорить о некоторых средних величинах поля зрения.

* Сейчас завод начал выпускать новую модель периметра, в котором дуга заменена полусферой и осуществлен ряд других улучшений конструкции.

Наглядное представление о них дает рис. 27. Жирная линия очерчивает поле одного глаза. Белое пространство в середине графика — область бинокулярного зрения. Косо заштрихованные поверхности — поля, видимые только одним глазом. По рисунку видно, что поле зрения одного глаза по горизонтали в направлении к носу 60°, к виску 90° (всего 150°), по вертикали вверх 50°, вниз 70°. Суммарное поле зрения обоих глаз по горизонтали 180°. Значит глаза охватывают взглядом одновременно половину горизонта.

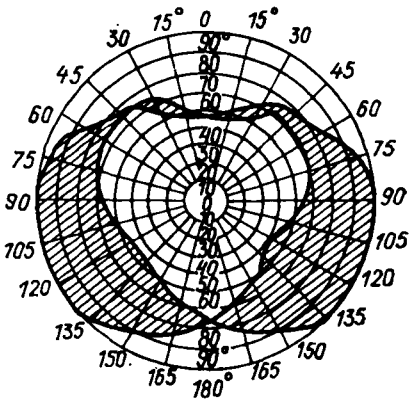


Рис. 27. Поле зрения каждого из глаз и общее бинокулярное поле

Однако острота зрения быстро падает от центра сетчатки к периферии. Зависимость между предельным углом δ (в минутах) и угловым расстоянием u тест-объекта от зрительной оси (в градусах) можно получить по формулам, которыми мы аппроксимировали [29] экспериментальные данные Пинегина и Травниковой [39]:

$$\left.\begin{aligned} \delta &= 0{,}82 + 0{,}056u \text{ при } 0 \leqslant u \leqslant 5°; \\ \delta &= 0{,}56 + 0{,}108u \text{ при } 5 \leqslant u \leqslant 35°. \end{aligned}\right\} \qquad (51)$$

Таким образом, на расстоянии 16° от оси острота зрения уже в 3 раза меньше, чем в центре. Мы видим предмет, но рассмотреть его детально не можем. И здесь помогает подвижность глаз.

35. Изменение точки фиксации взора

Глаза быстро и согласованно поворачиваются в сторону привлекшего внимание предмета и фиксируются на какой-нибудь его точке. Если предмет не очень мал, глаза последовательно останавливаются на ряде его точек, происходит то, что мы называем рассматриванием предмета. При этом в каждой очередной точке фиксации сходятся оси обоих глаз. Перевод глаза на тот или иной предмет, либо на ту или иную точку фиксации происходит по нашей воле — это произвольные движения глаз. В отличие от этого схождение осей обоих глаз нам не приходится регулировать сознательно: конвергенция происходит автоматически. Этот автоматизм исключительно стабилен и точен: даже если точку фиксации заслонить от одного глаза, его ось все равно будет направляться в точку фиксации видящего глаза.

Для регистрации движения глаз применяются разные способы, обзор которых дан в книге Ярбуса [51]. Опишем здесь только некоторые из них.

Электроокулография. Между роговицей и склерой существует некоторая разность потенциалов. Если приложить пару электродов к участкам кожи, расположенным с разных сторон около глаза, разность потенциалов между ними будет изменяться в зависимости от поворота глаза в довольно большом диапазоне пропорционально углу поворота. Измерение угла поворота с помощью электроокулографии можно производнть с точностью примерно 1°. Преимущество метода заключается в том, что он не требует жесткого крепления головы испытуемого.

Широко применяются различные оптические методы регистрации, в частности метод роговичного блика [24].

Роговичный блик — это мнимое изображение источника света, образующееся при отражении его в роговице, как в выпуклом сферическом зеркале. Центр вращения глаза лежит внутри глазного яблока на расстоянии приблизительно 13,5 мм от вершины роговицы, а центр кривизны роговицы — на расстоянии 6,8 мм. Изображение источника света получается приблизительно в фокусе поверхности роговицы, т. е. на расстоянии 3,4 мм от роговицы и 10,1 мм от центра вращения глаза. Поэтому при повороте глаза блик смещается, причем это смещение приблизительно пропорционально углу поворота.

В устройстве, описанном в статье [24], блик создается осветителем, снабженным фильтром КС-19, пропускающим в основном инфракрасный свет, не раздражающий глаз испытуемого. Роговичный блик с помощью объектива проецируется на фотоприемник, в качестве которого использован инверсионный фотодиод, позволяющий определить угол поворота глаза в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Если такое устройство закрепить на голове испытуемого, чтобы исключить ошибки, связанные со смещением головы, углы поворота глаз можно регистрировать с точностью до 20′.

Появление контактных линз позволило создать устройства, в которых для регистрации поворота глаз используется световой луч, отраженный от зеркальца, укрепленного на контактной линзе или вшлифованного в нее. Ярбус [51] вместо контактной линзы широко применяет различные конструкции легких присосок, укрепляемых на поверхности роговицы анестезированного глаза.

В результате применения различных методов регистрации движение глаз изучено довольно хорошо.

Произвольный поворот глаз на большие углы (более 1°) называют саккадическим движением глаз. В экспериментах часто используют стимулы в виде света ламп, вспыхивающих в разных местах поля зрения. Саккадическое движение производится с большой скоростью. Оно начинается через 0,2 с после

включения стимула [51] и происходит со скоростью, которая тем больше, чем больше угол поворота. Полная продолжительность движения мало зависит от его амплитуды и сохраняется в пределах 0,05—0,06 с [48]. Ускорения при саккадическом движении очень велики, так что примерно за сотую секунды достигается уже максимальная для данной амплитуды скорость. При повороте на 10° она равна 300°/с, при повороте на 30°—500°/с.

37. Стереоскопическое зрение

Два угла поворота зрительной оси определяют две координаты точки, на которую обращен взор. Но мир трехмерен, и зрение должно давать все три координаты каждого предмета. Третья координата — расстояние l до предмета осознается человеком в основном благодаря конвергенции и стереоскопичности зрения.

Как известно, расстояние до предмета, не приближаясь к нему, можно определить геометрическим путем, если известна длина некоторого отрезка — базы. Нужно из каждого конца базы измерить угол, составляемый с базой направлением на объект, и затем по одной стороне (базе) и двум углам построить треугольник, определив таким образом длину двух других его сторон. У человека базой служит расстояние между зрачками. У разных людей оно колеблется в пределах от 52 до 76 мм, и для расчетов его можно принять равным 62 мм.

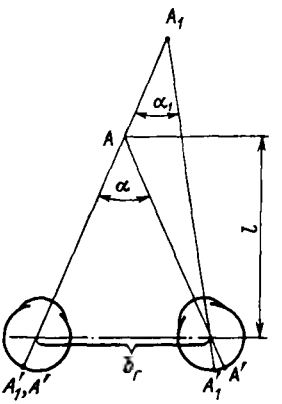


Рис. 28. Схема конвергенции и стереоэффекта

Из рис. 28 видно, что угол конвергенции α для любой точки пространства равен параллаксу этой точки по отношению к базе $b_г$. Очевидно, что

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}=\frac{b_г}{2l}.$$

При малых углах конвергенции $\operatorname{tg}(\alpha/2)\approx\alpha/2$ и поэтому

$$\alpha=b_г/l. \qquad (52)$$

При переводе взгляда с точки A на точку A_1 угол α уменьшается, и мы чувствуем, что A_1 дальше A. Конвергенция, связанная с определенным напряжением глазных мышц, дает нам возможность оценивать расстояние до точки фиксации. Фактически нам не обязательно переводить взгляд с одной точки на другую, чтобы ощутить разницу в расстояниях до них. Смотря на точку A, мы непосредственно чувствуем бóльшую удаленность точки A_1, ощущаем разницу Δl в расстоянии между ними. Это ощущение различия в расстоянии, ощущение трехмерности, рель-

ефа предметов при бинокулярном зрении называется стереоэффектом.

Когда человек смотрит на звездное небо, оси его глаз параллельны и изображения любой звезды в обоих глазах попадают в точки, лежащие на одинаковых меридианах и на равном расстоянии от зрительных осей глаз. Такие точки называются идентичными. Изображения звездного неба на обеих сетчатках совершенно тождественны.

Иначе обстоит дело при наблюдении более близких предметов. В левом глазу (см. рис. 28) изображение точки A_1 (так же как и точки A) лежит на зрительной оси, а в правом глазу — на расстоянии $A'A'_1$ от оси. Значит, эти точки неидентичны. Именно эта неидентичность, определяемая разностью параллактических углов $\Delta\alpha$, создает непосредственное ощущение, что точка A_1 дальше точки A.

При взгляде на окружающие нас предметы мы получаем на сетчатках обоих глаз разные изображения, но в мозгу они сливаются в одну трехмерную картину.

Оценим минимальную разницу в расстоянии Δl, ощутить которую дает нам возможность стереоскопическое зрение. Продифференцируем формулу (52):

$$d\alpha = -\frac{b_г}{l^2}\,dl. \tag{53}$$

Считая, что $\Delta\alpha \ll \alpha$, а $\Delta l \ll l$, заменим дифференциалы конечными приращениями:

$$\Delta\alpha = -\frac{b_г}{l^2}\Delta l,$$

откуда

$$\Delta l = -\frac{l^2}{b_г}\Delta\alpha. \tag{54}$$

Способность зрения ощущать разность параллактических углов очень велика. Обычно считают, что минимальная, еще ощутимая разность $\Delta\alpha$ параллактических углов равна $10''$. Отсюда следует, что при $l = 1$ м $\Delta l = 0{,}8$ мм; при $l = 10$ м $\Delta l = 8$ см; при $l = 100$ м $\Delta l = 8$ м.

Мы видим, что из-за квадратичной зависимости при увеличении расстояния погрешность в его оценке быстро растет. При $l = 1300$ м сам параллакс $\alpha = 10''$. Поэтому все предметы, находящиеся на расстоянии 1,3 км и дальше, кажутся нам одинаково удаленными.

В какой-то степени расстояние до близких предметов можно определять и одним глазом. Оценка расстояния при монокулярном зрении производится по напряжению аккомодации, необходимой для отчетливого видения объекта. Однако, глубина резкости при фокусировке глаза довольно велика, что обусловлено малым размером зрачка. В сущности, при монокулярном зрении диаметр зрачка служит базой, а поскольку он значительно мень-

ше расстояния между зрачками, гораздо меньше и точность монокулярного определения расстояния.

При монокулярном зрении нет двух одновременных картин, соответствующих сетчаткам разных глаз, и, следовательно, механизм непосредственного восприятия рельефа вовсе отсутствует. Правда, закрыв один глаз, мы как будто продолжаем ощущать объемность предметов, но это результаты своего рода иллюзии, которой помогает ряд факторов: память (мы только что видели те же предметы двумя глазами), видимый размер предметов, линейная перспектива, загораживание одних предметов другими. Люди, лишенные одного глаза, теряют непосредственное ощущение третьего измерения (глубины) и стараются восполнить этот недостаток большей подвижностью сохранившегося глаза и движениями головы для наблюдения одной и той же картины из разных точек.

Художник, используя линейную и воздушную перспективу, передает на плоском холсте трехмерность лежащего перед ним мира. Интересно отметить, что в силу описанных выше свойств зрения зритель воспринимает картину более рельефной, если смотрит на нее одним глазом.

38. Движение глаз при фиксации точки

До сих пор движению глаз мы противопоставляли их фиксацию, т. е. как будто неподвижное состояние. Однако точные исследования показали [10, 51,] что глаз никогда не бывает неподвижен. Движется он и при фиксации точки. В процессе фиксации глаз совершает три рода движений:

1. Тремор — колебания зрительных осей глаз с амплитудой около одной угловой минуты и с частотой от 30 до 90 Гц. Направление перемещения и частота при треморе постоянны и хаотически меняются.

2. Дрейф — медленные, также хаотически меняющиеся по скорости и направлению повороты глаз. Скорость движения при дрейфе от нуля до 30 угловых минут в секунду, средняя скорость примерно 6 минут в секунду. Продолжительность одного дрейфа может доходить до двух секунд, но чаще всего лежит в пределах от 0,2 до 0,8 с. Изображение фиксируемой точки перемещается по центральной ямке, но не выходит за ее пределы.

3. Маленькие непроизвольные скачки. В отличие от саккадических движений, производимых сознательно при перемещении точки фиксации, маленькие скачки не ощущаются наблюдателем. Их назначение — приблизить зрительную ось к точке фиксации, от которой ось отошла в процессе дрейфа. Амплитуда маленьких скачков лежит в пределах от 2 до 60′, причем совершаются они обоими глазами строго синхронно и согласованно. Продолжительность этих скачков 0,01—0,02 с. Они, как и дрейф и тремор, совершенно не заметны наблюдателю, которому кажется, что он постоянно фиксирует одну точку неподвижным взором.

39. Стабилизация изображений на сетчатке

Мы узнали, что изображения объектов, на которые смотрит человек, перемещаются по сетчатке довольно сложным, беспорядочным образом. Опыт показывает, что такая подвижность изображения не только полезна, но даже необходима для зрительного восприятия. Эксперимент заключается в том, что изображение искусственно делали неподвижным относительно сетчатки.

Дичберн [51] достигал стабилизации с помощью оптической системы, включающей в себя зеркальце на контактной линзе, надетой на глаз. Луч от тест-объекта, прежде чем попасть в глаз, проходил довольно сложный путь, в частности отражался от зеркальца на контактной линзе. А так как зеркальце двигалось вместе с глазом, можно было осуществить компенсацию смещения изображения объекта на сетчатке.

Ярбус [51] достигал той же цели более простым способом. На роговице перед зрачком укреплялась присоска с миниатюрной линзой, в фокусе которой помещался тест-объект в виде укрепленной на той же присоске пластинки молочного стекла с какой-нибудь фигурой на ней. Так как после линзы от каждой точки молочного стекла в глаз входил пучок параллельных лучей, изображение тест-объекта фокусировалось на сетчатке эмметропического глаза без аккомодации. В случае аметропии фокусировка достигалась смещением молочного стекла относительно линзы. Будем называть изображение, неподвижное относительно сетчатки, стабилизированным изображением. Другой глаз при опытах со стабилизированным изображением обычно закрывался черной повязкой. Поэтому о нем мы в дальнейшем говорить не будем за исключением особых случаев, когда его оставляли открытым.

Дичберн и Гинсборг констатировали, что при стабилизации изображения оно перестает быть устойчиво воспринимаемым: испытуемый только временами видит тест-объект, а бóльшую часть времени он остается невидимым.

Ярбус показал, что через 1—3 с после начала опыта тест-объект становится невидимым на все время опыта, длящегося несколько минут. Временные появления тест-объекта в опытах Дичберна и Гинсборга объяснялись, видимо, нарушением стабилизации в условиях их сложной установки. Что же видит испытуемый после исчезновения тест-объекта? По словам испытуемых, перед их глазом было сплошное поле, у некоторых — темно-серое, у других — черное или просто тьма. Ярбус предложил называть это пустым полем, показав, что считать его черным нельзя. Дело в том, что если на молочное стекло отбросить тень тонкого предмета, испытуемый сразу увидит черную тень. Увидит потому, что изображение на сетчатке изменилось. Но видеть черное на черном нельзя. Значит, пустое поле отличается от черного. Для пустого поля характерно, что оно кажется однородным, на нем неразличимы никакие детали.

Если какая-то часть тест-объекта сместится, она сразу станет видимой на 1—3 с, а затем всю картину снова затопит пустое поле.

Видимость можно восстановить не только перемещением тест-объекта или его деталей, но и изменением яркости молочной пластинки. В одной серии опытов тест-объект состоял из молочной пластинки, видимой испытуемым под углом 17°, и черных пятен на ней с угловыми размерами 6′, 4′, 2′, 1,5′ и 1′. Молочная пластинка освещалась прерывистым светом с частотой мельканий от 1 до 50 Гц.

Пока частота мельканий составляла 1—4 Гц, пустого поля не образовывалось и испытуемый на фоне мелькающего круга видел все пять черных пятен. При частоте 5 Гц самое малое пятно пропадало, сливалось с фоном. При частоте 6 Гц оставалось видимым только самое большое пятно (или два). При частотах 7—9 Гц все пятна исчезали — видимым оставался только мелькающий круг. При частотах 10—11 Гц снова восстанавливалась видимость двух (иногда трех) больших пятен, затем они исчезали и опять оставался видимым только круг. При критической частоте мельканий (в опыте она была равна 30 Гц) исчезал и круг — образовывалось сплошное пустое поле.

Можно восстановить восприятие и плавным изменением яркости, если это изменение происходит достаточно быстро. В опытах Ярбуса молочное стекло присоски было закрыто черной бумагой, в которой было сделано круглое отверстие диаметром 11°. Этот кружок был пересечен черной нитью толщиной в 3′. При неизменной яркости кружка L_0 он быстро переставал быть видимым — на всем поле зрения устанавливалось пустое поле. Затем яркость кружка начинали менять со скоростью dL/dt. При большой скорости испытуемый начинал видеть и кружок и нить. При несколько меньшей — только кружок. Можно было подобрать такую скорость dL/dt, при которой на фоне кружка были видны только отдельные части нити. Эта скорость и считалась пороговой. Оказалось, что пороговая скорость тем больше, чем больше начальная яркость L_0. Но величина

$$\frac{dL}{dt}\,\frac{1}{L_0}$$

не зависит от начальной яркости. Было установлено, что в описанном опыте с кружком и нитью

$$\frac{1}{L_0}\,\frac{dL}{dt} \approx 0{,}3\ \text{с}^{-1}.$$

Интересно отметить, что от знака dL/dt зависел видимый цвет кружка. При увеличении яркости кружок казался испытуемому оранжеватым, а при уменьшении — синеватым или даже синим.

В естественных условиях быстрые изменения яркости окружающих объектов происходят редко. Далеко не всегда в поле зрения находятся и движущиеся объекты. Поэтому изменения в сетчаточных изображениях происходят в основном вследствие движения глаз, как произвольного, так и непроизвольного в процессе фиксации. И только движение глаз позволяет нам непрерывно видеть окружающий мир.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

КОДИРОВАНИЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

40. Взаимодействие двух глаз

Оптическая система каждого глаза создает на сетчатке картину, соответствующую проекции объектов внешнего мира на сферическую поверхность дна глаза. Различия в яркости объектов

и их деталей передаются в виде различий в освещенности разных мест изображения. В другом глазе получается картина, похожая на первую, но не совпадающая с ней из-за того, что другой глаз находится на некотором расстоянии от первого. В паре изображений содержится информация о величине, форме и взаимном расположении предметов по всем трем координатам пространства. Эту информацию нужно передать в мозг и рационально обработать.

Попробуем сначала построить грубую модель такой передачи. Фоторецепторы возбуждаются тем сильнее, чем больше их освещенность. Все фоторецепторы, связанные с одним нервным волокном, посылают по нему в мозг сигнал, интенсивность которого зависит от степени возбуждения рецепторов, т. е. в конечном счете от их освещенности. Окончание зрительного волокна в мозгу передает определенной клетке мозга сведения об освещенности на соответствующем месте сетчатки, а все волокна — о распределении освещениости по всей сетчатке, т. е. обо всем изображении.

Аналогичным образом другой группе клеток передаются сведения об изображении на сетчатке другого глаза. Взаимодействие клеток этих двух полей мозга вырабатывает информацию об объемности видимых предметов.

41. Закон Вебера — Фехнера

Хотя интенсивность сигнала, передаваемого в мозг, тем больше, чем больше освещенность группы рецепторов, трудно допустить наличие прямой пропорциональности между этими величинами. Как известно, глаз может работать в диапазоне яркости, простирающемся на 10 порядков. Невероятно, чтобы максимальный сигнал мог быть в десять миллионов раз сильнее минимального.

Представление о возможном соотношении между различием в яркости ΔL двух участков поля зрения и различием в сигналах от этих полей дают результаты экспериментов. Еще в XVIII в. Бугер [22] устаиовил, что в широком интервале яркостей соблюдается закономерность, выражаемая формулой

$$\frac{\Delta L_{\text{п}}}{L} = \varepsilon, \tag{55}$$

где $\Delta L_{\text{п}}$ — пороговая разность яркостей, а ε — постоянная величина — пороговый контраст.

Закономерность, выражаемая формулой (55), была подтверждена экспериментом Кенига [48], который нашел, что в довольно широком интервале яркостей $\varepsilon = 0{,}02$. В действительности ε отнюдь не постоянная величина, она зависит, в частности, от яркости фона и от размера тест-объекта. Более подробио о пороговом контрасте мы будем говорить позже. Сейчас формула (55) нужна нам для самой общей оценки зависимости между

воздействующей на глаз яркостью и сигналом, посылаемым в мозг, или между яркостью L и ощущением яркости. Однако сразу возникает вопрос: чем измерять ощущение яркости?

Ощущение яркости иначе называют светлотой B и измеряют в порогах. Если, например, при увеличении яркости от L_1 до L ощущение возросло на n ступеней — n порогов, считают, что $\Delta B = n$.

Для определения связи между L и B воспользуемся формулой (55), считая, что яркость возросла не на $\Delta L_п$, а на бесконечно малую величину dL. Тогда и B возрастает не на один порог, а на бесконечно малую величину dB. Перепишем формулу (55) в виде

$$\frac{dL}{L} = \varepsilon\, dB \tag{56}$$

или

$$dB = \frac{1}{\varepsilon}\frac{dL}{L}. \tag{57}$$

Пусть яркость изменилась от L_1 до L. Найдем соответствующее изменение светлоты:

$$B - B_1 = \frac{1}{\varepsilon}\int_{L_1}^{L}\frac{dL}{L} = \frac{1}{\varepsilon}\ln\frac{L}{L_1}. \tag{58}$$

Считая, что для пороговой яркости $L_п$ светлота $B = 1$, получим

$$B - 1 = \frac{1}{\varepsilon}\ln\frac{L}{L_п}. \tag{59}$$

Для дневных яркостей светлота имеет порядок тысячи, т. е. $B \gg 1$, и можно пренебречь единицей:

$$B = \frac{1}{\varepsilon}\ln\frac{L}{L_п}. \tag{60}$$

Светлота (ощущение яркости) пропорциональна логарифму яркости, выраженной в относительных единицах. Эту зависимость называют обычно законом Вебера — Фехнера.

Однако все преобразования при переходе от формулы (56) к формуле (60) оправданы только при соблюдении двух условий: $\varepsilon \ll 1$ и $\varepsilon = \text{const}$. Оба условия приближенно соблюдаются в довольно широком диапазоне дневных яркостей ($\varepsilon = 0{,}02$), но при уменьшении яркости пороговый контраст перестает быть постоянным и при низких яркостях сильно возрастает. Поэтому формула (60) для практических расчетов непригодна. Ее можно применять только для качественной оценки связи между яркостью и светлотой: при передаче в мозговые центры яркость кодируется приблизительно по логарифмической шкале, благодаря чему светлота возрастает гораздо медленнее воздействующей на глаз яркости.

Учет зависимости ε от L приводит к формулам [35, стр. 77—79] значительно более сложным, чем формула (60). По одной из них можно рассчитать, что для яркости 10 кд/м^2 светлота $B = 760$. Увеличим яркость в 1000 раз, до $L = 10^4$ кд/м^2. По формуле (58) получим, что B увеличилась на 350 единиц, т. е. только в полтора раза.

Таким образом, предположение, что зависимость между L и B близка к логарифмической, приводит к весьма правдоподобному результату: к не очень большому диапазону возможных изменений ощущения яркости.

42. Электрические явления в зрительной системе

Приблизиться к пониманию механизма образования сигнала, передаваемого по волокну нерва, можно, изучив электрические явления, связанные со зрительным процессом.

Нужно сказать, что передача сигнала по нерву отнюдь не сводится только к электрическому сигналу. Это чрезвычайно сложный физико-химический процесс, далеко еще не изученный полностью. Но электрические явления всегда его сопровождают, а они сравнительно легко поддаются регистрации.

Различают три основных типа электрических явлений:

1) изменения в электроэнцефалограмме, вызываемые световыми воздействиями на глаз,— так называемый вызванный потенциал (ВП);

2) изменение разности потенциалов внутри самого глаза — электроретинограмма (ЭРГ);

3) импульсы, получаемые от отдельных волокон зрительного нерва или от хорошо локализованных малых участков сетчатки.

При исследовании ВП электроды прикладывают к голове вблизи зрительной (затылочной) области мозга. Запись снимаемой с электродов разности потенциалов называется электроэнцефалограммой. Для нее характерны постоянные колебания — так называемый α-ритм. При освещении глаза возникают изменения в электроэнцефалограмме, которые и называют вызванным потенциалом. Корреляцию между ВП и световым воздействием на глаз в последнее время изучают и даже делают попытки определять с помощью ВП остроту зрения или аметропию глаза [57].

Наибольшее число исследований электрофизиологии зрительной системы посвящено изучению электроретинограммы (см., например [13, 35 48]). Для снятия ЭРГ один электрод прикладывают к роговице обычно с помощью специальной линзы, а другой — к коже головы. Разность потенциалов ΔV (обычно говорят, просто потенциал), снимаемая с этих электродов, записывается с помощью самописца. Пример ЭРГ представлен на рис. 29. Изменение потенциала происходит в результате воздействия на сетчатку светового стимула, который начинается при $t = 0$ и заканчивается при $t = 0{,}5$ с. После небольшого отрица-

тельного изменения (волна *a*) отмечается быстрый подъем потенциала (волна *b*), которую обычно считают основной характеристикой степени возбуждения рецепторов световым раздражением. После быстрого спада волны *b* следуют медленный подъем и спуск (волна *c*) и наконец при выключении света — опять небольшой подъем (волна *d*). Заметим, что между слоями

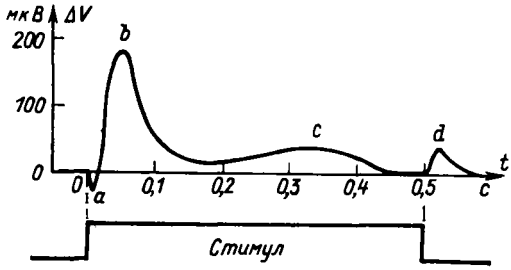


Рис. 29. Электроретинограмма

сетчатки 1 и 10 (см. рис. 17) всегда существует некоторая разность потенциалов, т. е. электрическое поле, направленное нормально к поверхности сетчатки. Световой стимул вызывает изменение напряженности поля, которое и регистрируется в ЭРГ как изменение разности потенциалов.

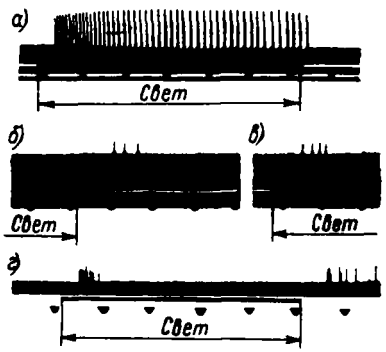


Рис. 30. Импульсы в отдельных волокнах зрительного нерва

Запись импульсов в отдельном волокне зрительного нерва, т. е. реакцию очень малого элемента сетчатки, можно получать с помощью микроэлектродов, вводимых в сетчатку, или с помощью выделения отдельного волокна зрительного нерва. Поэтому такие опыты производятся только на животных [13]. Однако есть все основания полагать, что в зрительной системе человека происходят в общем такие же явления. Типичные записи импульсов в отдельном волокне зрительного нерва приведены на рис. 30. На рис. 30, *а* нижняя белая линия — отметка времени дает расстояние между ее разрывами 0,2 с. Разрыв белой линии, проведенной немного выше, соответствует времени действия света на сетчатку (более 1 с). Гребенка черных вертикальных линий — отметки электрических сигналов в волокне зрительного нерва. Частота электрических импульсов в первом приближении пропорциональна логарифму освещенности того места

сетчатки, от которого идет исследуемое волокно. Но коэффициент пропорциональности — отнюдь не постоянная величина. Он зависит от многих факторов, прежде всего от состояния адаптации глаза. Кроме того, можно видеть, что в течение времени воздействия света частота не остается постоянной, а снижается, что можно считать следствием локальной адаптации освещенного элемента сетчатки под действием освещения, вызывающего появление импульсов.

Других особенностей электрических явлений в сетчатке мы коснемся несколько позже.

43. Модель зрительной системы

Теперь модель зрительной системы можно несколько конкретизировать. Оптика глаза создает на сетчатке изображение картины внешнего мира, причем освещенность каждого рецептора пропорциональна яркости проецируемого на него элемента картины. Имеются данные, что светочувствительные вещества сетчатки обладают фотопроводимостью [55]. Появляющиеся благодаря освещенности заряды движутся под влиянием электрического поля сетчатки. Через сетчатку протекает ток по нормали к ее слоям. Плотность тока пропорциональна освещенности данного элемента сетчатки, т. е. яркости изображаемого на нем элемента внешней картины. Когда на окончании волокна зрительного нерва накапливается достаточный ионный заряд, по волокну в мозг направляется сигнал — один из тех импульсов, которые зарегистрированы в виде пиков на рис. 30. Но тут уже наблюдается большое усложнение процесса: частота импульсов отнюдь не пропорциональна плотности тока. Как мы уже указывали, частота примерно пропорциональна логарифму яркости, а следовательно, логарифму плотности тока. Где-то в сетчатке, в системе амакриновых клеток, биполяров и ганглиозных клеток происходит сложная переработка информации — логарифмирование плотности тока и преобразование логарифма в частоту импульсов. Последняя операция напоминает введение цифрового отсчета, который получает все более широкое распространение в современных измерительных приборах. Итак, информация о яркости, кодированная частотой импульсов, по волокну зрительного нерва передается в мозг. Напоминаем, однако, что по нерву проходит не просто ток, а сложный процесс возбуждения, некоторое сочетание электрических и химических явлений. Отличие от электрического тока подчеркивается тем, что скорость распространения сигнала по нерву очень мала. Она лежит в пределах от 20 до 70 м/с.

Закодированная частотами импульсов информация о распределении яркости в наблюдаемой картине приходит в мозг, который должен ее декодировать, т. е. расшифровать. Декодирова-

ние — очень сложный процесс, в который втягивается значительная часть коры мозга. Ведь нужно, сопоставив изображения в обоих глазах, получить сведения о рельефе наблюдаемой картины. Нужно осмыслить картину, т. е. узнать в ней знакомые предметы независимо от их угловых размеров и ракурса. И самое главное — изображение нужно спроецировать обратно в пространство предметов. Ведь мы воспринимаем не какую-то картину в наших глазах или в нашем мозгу, а непосредственно видим все предметы на тех местах, где они находятся.

44. Соотнесенность

До сих пор существуют люди, которые удивляются тому, что мы видим предметы не вверх ногами, несмотря на отсутствие оборачивающей системы в глазу. Но нужно принять во внимание, что изображение на сетчатке — это лишь первый процесс в цепи сложнейших физиологических и психологических преобразований световых сигналов, происходящих в организме. Аналогия с более простым устройством — передающей телевизионной трубкой, в которой процесс передачи тоже начинается с перевернутого изображения, помогает уяснению вопроса.

Вопрос о перевернутости изображения в глазу волновал многих ученых. В 1038 г. Ибн Хайтам, по-видимому, впервые упоминает о камере-обскуре. Затем ее вновь изобретает Леонардо да Винчи. Он указывает, что такое же изображение может получиться в глазу. Маврикиус (1575 г.) сравнивал хрусталик с линзой, но отрицал перевернутость изображения в глазу, раз мы не видим все перевернутым. Но уже Кеплер (1602 г.) допускал, что изображение в глазу перевернуто. «Опыт и активное вмешательство души — вот что выправляет изображение»,— говорил он.

Именно опыт и действие сознания не только выправляют изображение, но и приводят к гораздо более чудесному и удивительному результату: исторгают изображение из недр наших глаз и возвращают его на место предметов, правильное расположение которых вокруг нас мы непосредственно воспринимаем.

Впрочем, Сеченов [44] считал, что не только выправление (поворот) изображения, но и вынесение его в пространство предметов (Сеченов называет это соотнесенностью) не требуют жизненного опыта. Соотнесенность — врожденное свойство зрения, закрепленное наследственностью в силу его огромного биологического значения. Проведенные в последнее время опыты по изучению зрения грудных младенцев [54] говорят в пользу этого провидения великого русского физиолога.

45. Некоторые детали процесса кодирования

Итак, мы описали модель действия зрительной системы, уже более близкую к экспериментальным данным. Но и она еще слишком упрощена. В действительности зрение работает по гораздо более сложной (и гораздо более рациональной) схеме.

На рис. 30 изображены реакции на свет волокон, отличающихся по своим свойствам от волокна, дающего реакцию типа 30, *а*. У волокна типа *б* всплески импульсов появляются только после выключения света. У волокна типа *в* — только после включения. Наконец, волокна типа *г* реагируют и на включение, и на выключение. Итак, от сетчатки в зрительном нерве идут четыре типа волокон:

а — волокно, непрерывно генерирующее импульсы, пока связанный с ним элемент сетчатки освещен;

б — *off*-волокно, реагирующее несколькими импульсами на выключение света или на уменьшение освещенности соответствующего элемента сетчатки;

в — *on*-волокно, реагирующее на включение света или на увеличение освещенности;

г — *on* — *off*-волокно, реагирующее и на включение, и на выключение света, на любое изменение освещенности.

Оказывается, волокон типа *б*, *в* и *г* в сетчатке гораздо больше, чем волокон типа *а*. Волокна, передающие сведения о неизменной освещенности, одни не могут передавать в мозг зрительную информацию, что доказывается опытами Дичберна и Ярбуса. Нервные волокна передают в основном сведения об изменении освещенности каждого элемента сетчатки, т. е. регистрируют первую производную освещенности по времени. Для этого совсем не нужно, чтобы изменялась яркость наблюдаемой картины: движение глаз превращает различие в яркости различных частей картины в различие в освещенности каждого из элементов сетчатки. Когда мы обращаем взгляд к какой-нибудь картине внешнего мира, совместная работа рецепторов и всех видов волокон дает нам возможность воспринять и осознать эту картину. Затем (через 2—3 с) бо́льшая часть волокон прекращает передачу. Нет смысла передавать, что ничего не изменяется. Но если никаких изменений во всей картине не происходит 2—3 с, она уходит из сознания и замещается пустым полем. Однако в реальных условиях какие-то изменения происходят всегда, хотя бы для небольшой части рецепторов. Предположим, при постоянном освещении мы непрерывно фиксируем взгляд на середине серого квадрата, видимого на белом фоне. При движении глаз некоторые колбочки постоянно переходят с белого поля на серое и обратно. Это колбочки, лежащие на границах изображения квадрата. Пограничные колбочки сигнализируют о наличии перепада яркостей, поэтому контур остается непрерывно видимым. Но ведь и середину квадрата мы непрерывно видим серой, а любую точку фона — белой, между тем как оттуда никаких сигналов не поступает. Сигналы с этих мест поступили в первый момент, когда мы взглянули на квадрат. В дальнейшем отсутствие сигналов означает, что ничего не меняется. И мы продолжаем видеть то, о чем было просигнализировано в первый момент. Значит, в зрительной системе существует запоминающее устройство, которое в сознании поддерживает неизменным впечатление, создавшееся в первый момент. Сигналы с контура квадрата подтверждают наличие перепада яркостей на его границах, показывая тем самым, что система работает исправно и запоминающее устройство дает правильную информацию. Однако, если по всему полю зрения нигде ничего не меняется, запоминающее устройство выключается. Но в реальных условиях так никогда не бывает. Ученым пришлось немало потрудиться, чтобы искусственно стабилизировать изображение на сетчатке.

Но в чем смысл такой системы передачи информации? Смысл и преимущества ее очевидны. Когда передаются только сигналы об изменениях, значительно разгружается канал передачи. В нашем примере с серым квадратом десятки тысяч колбочек, на которые падало изображение средних частей квадрата, и десятки тысяч колбочек, на которые падало изображение фона,

не передавали никаких сообщений. Десятки тысяч волокон зрительного нерва и десятки тысяч клеток в мозгу были освобождены от бесполезной работы приема сообщений о том, что ничего не произошло.

Замечательно, что многие изобретатели стараются сейчас внедрить этот принцип в технику телевидения [13]. Дело сводится к тому, чтобы не передавать полмиллиона сигналов на каждый кадр, а ограничиться только передачей сигналов об изменении яркости в тех местах, где они происходят, возложив обязанность воспроизведения неменяющейся яркости на запоминающие устройства. Вспомним, что именно чрезмерная загрузка канала заставляет вести телепередачи на столь высоких частотах. Разгрузка канала открывает перед техникой телевидения весьма заманчивые перспективы.

46. Полосы Маха

Замечательно, что в некоторых случаях по нервным волокнам передается информация и о второй производной яркости. Существует явление, которое называют полосами Маха [49]. Если две яркости L_1 и L_2 разделены на плоскости областью, в которой яркость плавно повышается от L_1 до L_2 (рис. 31), то глаз видит (символом S обозначено ощущение яркости) две полосы, идущие по краям области перехода: вблизи большой яркости — полосу, еще более светлую, а вблизи малой — более темную. Полосы Маха относят к числу иллюзий, оптических обманов. Однако следует сказать, что такой «обман» помогает заметить реально существующий, но размытый в переходной области контраст, подчеркивает нечеткий контур объекта, что безусловно биологически полезно.

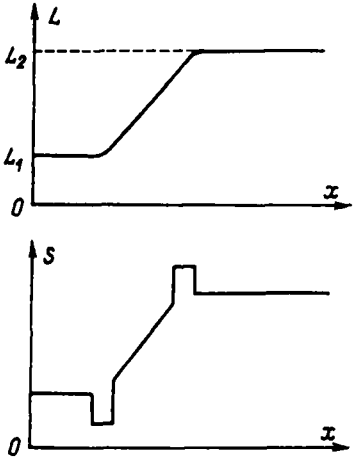


Рис. 31. Схема полос Маха

47. Кооперация рецепторов

Зрительная система проявляет замечательную гибкость в смысле способности объединять или наоборот разъединять отдельные рецепторы. Мы уже говорили об объединении рецепторов при переходе к малым яркостям. Но такое объединение происходит в процессе темновой адаптации, когда времени на перестройку кодирующих механизмов вполне достаточно. Гораздо более удивительна практически мгновенная перестройка при неизменном уровне адаптации. При высокой яркости фона, когда нужно и возможно различать отдельные объекты большого контраста, но малых угловых размеров, каждая фовеальная колбочка действует, очевидно, отдельно. Но уже при различении минимального сдвига штрихов по шкале нониуса помогает

кооперация многих колбочек, расположенных вдоль изображения штрихов. Еще яснее проявляется объединение колбочек при уменьшении контраста.

Известно, например, что даже при большой яркости мы не видим кружка, контраст которого с фоном равен 0,03, если диаметр кружка составляет 1′. Но при диаметре 30′ кружок виден. Значит, колбочки, размер каждой из которых не более 1′, как-то объединяются, чтобы воспринять малый контраст, не воспринимаемый каждой из них. А почему одна колбочка, точнее, каждая из двух соседних, лежащих на границе раздела контрастирующих областей, не может воспринять малый контраст? Потому что за время сохранения зрительного впечатления (время инерции θ) она активно поглощает слишком малое число фотонов и относительные флуктуации этого числа слишком велики. Сигнал тонет во флуктуациях, заглушается шумом. А на площадь, соответствующую тридцати минутам, попадает в 900 раз больше квантов, и относительные флуктуации уменьшаются в 30 раз. Теперь сигнал может уже преобладать над шумом *.

48. Осмысление изображений и опознание образов

Над детальным изучением механизмов передачи информации в зрительной системе работают многие ученые [12, 20, 48]. Многое сделано, но, пожалуй, возникло еще больше новых нерешенных вопросов. Зрительная система слишком сложна и вместе с тем чудесно приспособлена для решения жизненно важных задач. В результате кодирования, передачи и расшифровки полученных сведений до сознания доходит то, что существенно и жизненно важно, и исключается все, что мешает осмыслению увиденного. Мы можем видеть то, чего нет в объекте, но что помогает нам лучше его воспринять (например, оконтуривание объекта полосами Маха). Мы можем не видеть того, что реально существует, но что помешало бы правильному восприятию. Мы не замечаем радужных полос, которые связаны с хроматической аберрацией глаза. Не замечаем в поле зрения и темного пятна даже при монокулярном зрении, хотя место вхождения в сетчатку зрительного нерва не воспринимает света — слепое пятно. Оно существует, но для его обнаружения необходимо ставить специальный опыт.

Для автоматических систем весьма трудной оказывается задача опознания образа. Зрение легко справляется с такой задачей. Мы сразу узнаем, скажем, букву А независимо от того, какого она размера и как повернута. Нам не кажется, что человек стал меньше ростом, если он отошел от нас на 20 шагов. При движении глаз изображение скользит по сетчатке, однако мы не считаем, что предметы, на которые мы смотрим, движутся. И, пожалуй, самое удивительное то, что, как уже было

* Подробнее об этом в гл. 11.

упомянуто, мы видим все предметы на тех местах, где они действительно находятся, т. е. объективизируем зрительный образ.

49. Зрение и кибернетика

Разработка технического устройства, способного воспроизводить некоторые функции зрения — одна из важнейших (и труднейших) задач бионики и кибернетики. В некоторых случаях представляет интерес также математическое моделирование зрения — составление алгоритмов, позволяющих рассчитать (обычно на ЭВМ), будет ли в заданных условиях решена поставленная зрительная задача. Часто математическую модель удается построить без проникновения в сущность зрительных процессов, по методу кибернетического черного ящика [50]. Черным ящиком может быть любой прибор (в частности, живой орган), о механизме работы которого нам заранее ничего не известно. Не пытаясь проникнуть внутрь, мы прилагаем к прибору — подаем на его вход — измеренные воздействия и измеряем ответы на выходе прибора. Проделав ряд экспериментов, стараемся найти функцию, устанавливающую соотношение между интенсивностью воздействия и ответом. Найденную зависимость можно принять за переходную функцию, пригодную для формального описания процессов, происходящих внутри прибора. В сущности, такой подход к изучению зрения в зародыше наметился уже давно, можно сказать, со времени Бугера. Начиная с 1947 г. публикуются работы [26], в которых уже последовательно используется принцип черного ящика, хотя еще без такого названия, поскольку кибернетика в то время только зарождалась [60]. В последующие годы метод кибернетического черного ящика широко использовался как для экспериментального изучения зрительных функций, так и для математического моделирования работы зрения.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ИНЕРЦИЯ ЗРЕНИЯ

50. Механическая аналогия

При заточке на точильном круге стального инструмента из него вырывается веер искр — яркие полосы длиной 30—60 см. Это раскаленные крупинки наждака и стали, быстро пролетающие в воздухе. Но видим мы не движущуюся крупинку, а всю ее траекторию одновременно: когда крупинка остывает и погасает в конце своего пути, глаз еще сохраняет впечатление от ее яркости в момент вылета. Здесь наглядно проявляется инерционность зрительной системы или, короче, инерция зрения.

Слово «инерция» прежде всего утвердилось в механике и стало там одним из основных понятий. Движение по инерции в механике может продолжаться сколь угодно долгое время: движение планет в солнечной системе длится миллиарды лет. На Земле же всегда имеются силы сопротивления, и поэтому движение по инерции в земных условиях длится недолго. Именно в таком смысле, как сравнительно недолгое последействие, термин «инерция» стал входить в другие области науки. Например, академик С. И. Вавилов применяет этот термин к явлениям люминесценции. Инерция люминофора выражается в продолжении его свечения после удаления возбуждающего света или другого энергетического воздействия. Инерцию Вавилов вводит даже в основное определение люминесценции [6]. Будучи одним из видов излучения, люминесценция неизбежно связана с затратой энергии, и, следовательно, свечение «по инерции» всегда более или менее быстро затухает.

В таком же смысле говорят и об инерции зрения. Развитие зрительного впечатления можно сравнить с движением тела в вязкой среде. Аналогия, хотя и формальная, может помочь уяснению развития зрительного впечатления во времени.

Пусть шар, масса которого M, движется под действием силы $f(t)$ в вязкой среде. По закону Стокса сила сопротивления движению шара пропорциональна его скорости v. Коэффициент пропорциональности обозначим через R: он в свою очередь пропорционален радиусу шара и вязкости среды. Движение шара описывается уравнением

$$M\frac{dv}{dt} + Rv = f(t). \tag{61}$$

Пусть в момент $t = 0$ скорость $v = 0$. Сила в промежуток времени от 0 до t_1 имеет постоянное значение f_1, а после момента t_1 она равна нулю. Тогда интегрирование уравнения для интервала $0 \leqslant t \leqslant t_1$ даст

$$v = \frac{f_1}{R}(1 - e^{-t/\mu}), \tag{62}$$

а для $t > t_1$

$$v = v_1 e^{-\frac{t-t_1}{\mu}}, \tag{63}$$

где $\mu = M/R$, а v_1 — скорость в момент t_1.

Мы видим, что скорость тела непропорциональна действующей силе. Пропорциональность наступает только после бесконечно долгого действия силы, когда оказывается, что $t \gg \mu$, но меньше t_1 [см. формулу (62)]. Но величина μ прямо пропорциональна массе тела M, т. е. величине, характеризующей его инерционность: чем больше инерция, тем дольше нестационарный процесс. На рис. 32 изображен график скорости тела массой в 1 кг, на которое в течение 0,1 с действует сила 20 Н, причем $R = 20$ кг/с.

Примерно такую же форму будет иметь график зависимости ощущения S от яркости L, которая воздействует на глаз в течение 0,1 с. П-образный импульс яркости вызывает постепенный подъем ощущения яркости, которое за 0,1 с не достигает значения, соответствующего долговременному действию той же яркости. После прекращения действия света S постепенно спадает, приближаясь к нулю.

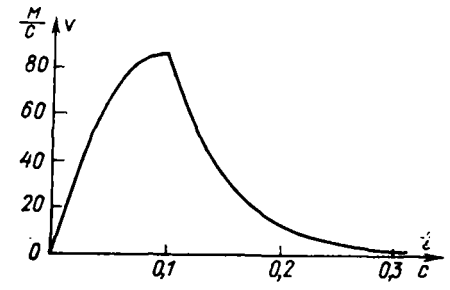


Рис. 32. График движения тела в вязкой среде

51. Эффективная яркость

Для перехода от общих рассуждений и аналогий к точным формулам необходимо условиться, что обозначаем мы символом S, вместо расплывчатого термина «ощущение» ввести какую-то определенную, измеримую хотя бы принципиально величину. Такую величину мы назовем эффективной яркостью ([26] стр. 11—13). Ощущение есть факт нашего сознания, и ни психология, ни физиология не выработали методов его количественной оценки. Остается один способ: проектировать ощущение обратно во внешний мир и сравнивать его с ощущением от других аналогичных раздражений.

При обычном визуальном фотометрировании сравниваемые яркости действуют на глаз достаточно долгое время. За длительное время между яркостью и ощущением яркости устанавливается однозначная зависимость. Поэтому можно было бы положить, что ощущение длительно действующей яркости просто равно этой яркости. Однако наблюдения и опыт говорят, что ощущение пропорционально скорее логарифму яркости, чем самой яркости (закон Вебера — Фехнера). Чтобы не вступать в конфликт с установившимися представлениями, мы ввели другой термин — «эффективная яркость», считая, что эта величина однозначно связана с ощущением яркости. Обозначим ее $L_э$. Характер их связи, в сущности, не имеет значения. Будем считать только, что эта связь прямая, т. е. с увеличением эффективной яркости растет и ощущение яркости. Значит, при длительном действии яркости эффективная яркость $L_э$ однозначно зависит от L, и мы можем считать, что в этом случае обе величины просто равны друг другу: $L_э = L$.

Что же мы выиграли от введения новой величины? То, что эффективная яркость $L_э$ перестает быть равной яркости L, как только L становится величиной, переменной во времени. Здесь уже нарушается однозначная зависимость между действующей в данный момент яркостью и ощущением яркости, эффективная яркость $L_э$ перестает быть равной действующей яркости L и

начинает по-настоящему выполнять свои функции количественной характеристики зрительного ощущения. Так, например, если яркость 100 кд/м² подействует на глаз в течение 0,02 с, эффективная яркость не превысит 40 кд/м².

Для пояснения изложенного приведем аналогию с фотоэлементом. Представим себе фотометр, состоящий из фотоэлемента и стрелочного гальванометра, шкала которого проградуирована в люксах. Конечно, показания гальванометра будут соответствовать освещенности фотоэлемента только при условии, что освещенность достаточно долгое время остается постоянной. Осветим фотоэлемент так, чтобы освещенность 100 лк действовала на него только 0,1 с. Стрелка покажет, например, 12 лк и вернется на 0. Значение 12 лк здесь нельзя, конечно, считать освещенностью, но можно назвать эффективной освещенностью. При переменной освещенности фотоэлемента гальванометр в каждый данный момент будет показывать какое-то число — эффективную освещенность. Соотношение между истинной и эффективной освещенностью будет зависеть от инерционных свойств системы, т. е. от инерции фотоэлемента, индуктивности проводов и гальванометра и момента инерции подвижной части гальванометра.

Конечно, измерить эффективную яркость много труднее, чем эффективную освещенность в этом примере с фотометром. Однако принципиально такое измерение возможно, а в некоторых случаях даже легко осуществимо. Так, например, если яркость поверхности 100 раз в секунду принимает значения то 0, то 100 кд/м², причем темные и светлые промежутки времени равны между собой, эффективная яркость оказывается постоянной и ее можно измерить обычным визуальным фотометрированием. Равна она в данном случае 50 кд/м². При соблюдении некоторых предосторожностей фотометрированием может быть найдена и эффективная яркость отдельной короткой вспышки. Отсюда вытекает и наиболее наглядная формулировка самого понятия «эффективная яркость». Эффективной яркостью некоторого поля в данный момент мы называем величину, равную яркости второго поля, с которым первое может быть фотометрически уравнено визуальным способом, причем яркость второго поля длительное время сохраняет постоянное значение.

52. Вычисление эффективной яркости

Установим некоторое формальное математическое соотношение между яркостью $L(t)$ и эффективной яркостью $L_э(t)$, рассматривая обе величины как функции времени t.

Зрительный процесс состоит из ряда дискретных элементарных актов, начиная с поглощения отдельных фотонов и кончая передачей импульсов возбуждения по зрительному нерву. Но в известных границах можно пользоваться и для яркости и для

эффективной яркости их средними значениями и применять плавные, сглаженные кривые функциональных зависимостей.

Начнем с рассмотрения $dL_э$ — бесконечно малого изменения эффективной яркости за бесконечно малый интервал времени dt. Конечно, $dL_э$ должно зависеть от $L(t)$ — яркости, действующей на глаз за время dt. Но $dL_э$ зависит не только от $L(t)$. Пусть сотую секунды тому назад всякая яркость перестала действовать на глаз и в настоящий момент $L(t) = 0$. Но вследствие инерции зрения $dL_э \neq 0$ и $L_э \neq 0$. Эффективная яркость еще не стала равна нулю, но она уменьшается, затухает и, следовательно, $dL_э < 0$. Для отыскания связи между dL и $dL_э$ необходимо знать закон, по которому происходит затухание эффективной яркости. Однако на этапе чисто математического исследования достаточно ввести функцию затухания формально, не устанавливая пока ее конкретного вида.

Отличная от нуля яркость $L(t)$ вызывает процесс, приводящий к увеличению эффективной яркости, но идущий одновременно со спонтанным ее уменьшением вследствие затухания. Обозначим через $dL'_э$ увеличение эффективной яркости, обусловленное воздействием яркости $L(t)$. Естественно предположить, что в малом интервале времени $dL'_э$ пропорционально $L(t)$ и dt:

$$dL'_э = CL(t)\,dt, \tag{64}$$

где C — коэффициент пропорциональности.

Определим теперь эффективную яркость для некоторого момента $t = \tau$. Для этого недостаточно проинтегрировать $dL_э$ от $-\infty$ до τ, так как в выражении (64) не учтено спонтанное убывание эффективной яркости со временем. От элемента эффективной яркости $dL_э$, возникшего за время t, к моменту τ останется только некоторая часть $dL_э$, причем отношение $dL_э/dL'_э$ будет тем меньше, чем дольше шло затухание, т. е. чем больше промежуток времени $\tau - t$. Иначе говоря,

$$\frac{dL_э}{dL'_э} = A(\tau - t), \tag{65}$$

где A означает некоторую функцию промежутка времени $\tau - t$ — функцию затухания.

Итак,

$$dL_э = dL'_э A(\tau - t) = CL(t)\,A(\tau - t)\,dt.$$

Именно $dL_э$, а не $dL'_э$ следует интегрировать, чтобы получить эффективную яркость в момент τ:

$$L_э(\tau) = C\int_{-\infty}^{\tau} L(t)\,A(\tau - t)\,dt. \tag{66}$$

Для выяснения смысла коэффициента C положим, что на глаз длительное время действует постоянная яркость L_1. Тогда по определению $L_э(\tau) = L_1$, т. е.

$$L_1 = CL_1 \int_{-\infty}^{\tau} A(\tau - t)\, dt,$$

откуда

$$C \int_{-\infty}^{\tau} A(\tau - t)\, dt = 1. \tag{67}$$

Интеграл не зависит от избранного значения τ. Действительно, введем новую перемениую $x = \tau - t$; для нее $dx = -dt$. Нижний предел станет теперь $+\infty$, а верхний обратится в 0. Вместо минуса перед интегралом поменяем местами верхний и нижний пределы и получим

$$\int_{-\infty}^{\tau} A(\tau - t)\, dt = \int_{0}^{\infty} A(x)\, dx. \tag{68}$$

Перепишем формулу (67), пользуясь формулой (68), и вернемся к прежней переменной t (так как символ переменной интегрирования не влияет на значение интеграла):

$$C \int_{0}^{\infty} A(t)\, dt = 1. \tag{69}$$

Из формулы (65) видно, что функция затухания A — величина безразмерная. Следовательно, интеграл в формуле (69) имеет размерность времени, откуда размерность C — $с^{-1}$. Введем величину, обратную C:

$$\vartheta = 1/C.$$

Тогда

$$\int_{0}^{\infty} A(t)\, dt = \vartheta. \tag{70}$$

53. Время инерции

Для выяснения физического смысла величины ϑ представим себе, что некоторая постоянная яркость L_1 действовала на глаз долгое время и прекратила свое действие в момент $t = 0$. Значит, при $t = 0$ эффективная яркость $L_э = L_1 = L_{э1}$ (рис. 33). Воспользуемся снова аналогией с движением тела в вязкой среде после прекращения действия силы — см. формулу (63).

Поставим вместо v_1 эффективную яркость в момент $t = 0$,

т. е. $L_{э1}$, а вместо $e^{-\frac{t-t_1}{\mu}}$ функцию затухания из формулы (65). Ввиду того что $t_1 = 0$, у нас остается только одна переменная времени τ, которую мы обозначаем символом t. Итак,

$$L_э(t) = L_{э1} A(t). \tag{71}$$

Кривая на рис. 33 изображает затухание эффективной яркости $L_э(t)$ после прекращения светового воздействия. Казалось бы, по кривой можно найти и время сохранения зрительного впечатления (назовем его Λ), т. е. время, за которое $L_э(t)$ падает до нуля. Но $L_э(t)$ асимптотически приближается к оси времени, и указать точку $L_э(t) = 0$ можно лишь условно. С таким затруднением сталкивались все исследователи времени сохранения. Сегнер [26] нашел, что $\Lambda = 0{,}5$ с; д'Арси получил $\Lambda = 0{,}13$ с, а Кавалло [26] 0,1 с. Плато [22] предлагает различать две величины: Λ_1 — полное время сохранения зрительного ощущения и Λ_2 — время кажущегося постоянства зрительного ощущения. По Плато $\Lambda_1 = 0{,}35$ с; $\Lambda_2 \approx 0{,}01$ с. Взглянув на рис. 33 и на формулу (70), мы видим, что ϑ равно отрезку оси времени, на котором строится прямоугольник, площадь которого $L_{э1}\vartheta$ равна площади под кривой затухания. Иначе говоря, ϑ — время, в течение которого сохранялось бы зрительное ощущение, если бы оно какое-то время сохранялось полностью (оставалось равным $L_{э1}$), а потом сразу падало до нуля. Введенную нами величину ϑ — эффективное время сохранения зрительного впечатления будем называть далее временем инерции.

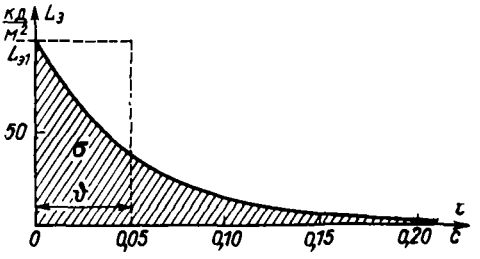


Рис. 33. График уменьшения эффективной яркости $L_э$ после прекращения светового воздействия

Площадь под кривой $L_э(t)$

$$\sigma = \int_0^\infty L_э\, dt = L_{э1}\vartheta$$

54. Эффективные величины

Инерцию зрения приходится учитывать при расчете видимости: а) объектов, появляющихся на короткое время τ; б) быстро движущихся объектов; в) коротких вспышек точечных источников света. По аналогии с эффективной яркостью для характеристики объектов «а» и «б» полезно ввести новую величину — эффективный контраст $K_э$, а для характеристики объектов «в» — эффективный блеск $E_э$.

Рассмотрим более подробно первый случай. Пусть наблюдатель непрерывно смотрит на экран, яркость которого L. На короткий промежуток времени τ на экране появляется объект, яркость которого L_s. Контраст объекта с фоном

$$K = \frac{L - L_s}{L}. \tag{72}$$

Поскольку этот контраст существует только короткое время τ, глаз воспримет эффективный контраст $K_э$, который можно получить, подставив в формулу (72) вместо яркостей эффективные яркости:

$$K_э = \frac{L_э - L_{эs}}{L_э}. \tag{73}$$

Воспользовавшись формулами для эффективной яркости и произведя некоторые преобразования ([26], стр. 26, 27), получим

$$K_э = \frac{K}{\vartheta} \int_0^\tau A(t)\, dt. \tag{74}$$

О функции затухания мы знаем только, что при $t \to 0$ $A(t)$ стремится к единице, поэтому, если τ мало ($\tau \ll \vartheta$), то

$$\int_0^\tau A(t)\, dt \approx \tau \tag{75}$$

и, следовательно,

$$K_э = K\tau/\vartheta. \tag{76}$$

Эффективный контраст во столько раз меньше обычного контраста, во сколько время экспозиции τ меньше времени инерции ϑ.

56. Экспериментальное определение времени инерции

Формулы (74) и (75) дают возможность экспериментально определить как ϑ, так и функцию затухания. Принципиально для этого достаточно измерить пороговый контраст ε для какого-нибудь объекта при стационарном наблюдении, а потом при разных контрастах $K_п$ доводить $K_э$ до порога видимости подбором времени экспозиции τ. Получив целый ряд пар $K_п$ и τ (индекс «п» показывает, что малое время экспозиции делает контраст пороговым), обращаем внимание на их произведения. Пока $K_п\tau = \text{const}$, мы можем пользоваться формулой (76) и, подставив в нее $K_э = \varepsilon$, найти ϑ. Затем ε и ϑ можно ввести в формулу (74) и, подставляя в нее те значения $K_п$, при которых $K_п\tau \neq \text{const}$, и решая уравнения, получить ряд значений

интеграла при разных τ. По значениям определенных интегралов можно судить о виде подынтегральной функции [26].

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 34. Молочное стекло *М* освещено лампой *Л1*. Посеребренный кружок *С* на диагональной плоскости кубика отбрасывает тень на стекло *М*. Проекцию кружка *С* на молочное стекло будем называть маркой. Марка освещается лампой *Л2*, действительное изображение нити которой образуется в точке *А*. Система отъюстирована так, что при равенстве освещенностей на молочном стекле от ламп *Л1* и *Л2* марка совершенно не видна ($K = 0$). Освещенность от лампы *Л2* можно регулировать посредством нейтрального клина *П* (поглотитель), обеспечивая полную невидимость марки.

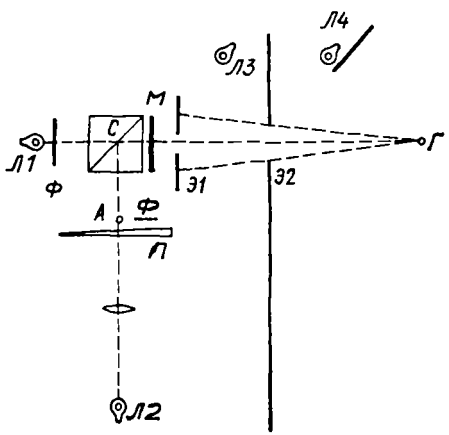


Рис. 34. Схема установки для измерения порогового контраста

Глаз наблюдателя помещался в точку *Г* (другой глаз прикрывался заслонкой). Яркость стекла *М* была 32 кд/м², яркость экранов *Э1* и *Э2* с помощью ламп *Л3* и *Л4* поддерживалась на том же уровне. Наблюдатель помещался на трех различных дистанциях, которым соответствовали размеры марки 11′, 7,3′ и 5,5′ (форма марки была овальной; за ее размер принимался диаметр равновеликого с овалом кружка).

Поместив наблюдателя на одной из дистанций, сначала определяли пороговый контраст ε многократным измерением смещения клина *П* в одну и другую сторону до того положения, при котором марка становится едва заметной. По половине разности отсчетов в ту или в другую сторону находили ε, а клин ставили в среднее положение и приступали ко второму этапу эксперимента.

Нейтральный фильтр *Ф*, который при его установке в точку *А* создавал контраст *К*, прикрепляли к концу маятника. Экспериментатор отклонял маятник на 45° и отпускал его качаться. Сначала фильтр *П* проходил точку *А* за время τ, столь короткое, что испытуемый не видел марки. Но амплитуда маятника сокращалась, и в какой-то момент испытуемый улавливал появление марки — мелькание. Экспериментатор отмечал угол $\alpha_п$ отклонения маятника, соответствующий первому появлению марки для испытуемого. Зная период маятника (1,79 с), длину фильтра *П* и угол $\alpha_п$, легко сосчитать τ. Каждому испытуемому предъявлялось 6 фильтров, создающих контрасты *К*, равные 100; 85; 79; 58; 28 и 20%. Было найдено, что пока $\tau < 0{,}01$ с, произведение $K_п\tau$ практически постоянно. Подставляя $K_п\tau$ и ε в формулу (76), получаем

$$\vartheta = K_п\tau/\varepsilon. \qquad (77)$$

Для трех наблюдателей при всех вышеуказанных размерах марки среднее время инерции оказалось равным пяти сотым секунды.

57. Функция затухания

Определение функции затухания по немногим значениям ее интеграла — более сложная задача. Более ста лет тому назад Аллар [119] высказал предположение, что зрительное впечат-

ление убывает точно так же, как по закону Ньютона охлаждается тело малых размеров. Применительно к эффективной яркости $L_э$ этот закон можно записать в виде:

$$\frac{dL_э}{dt} = -\mu L_э,$$

откуда

$$L_э = L_{э1} e^{-\mu t}, \tag{78}$$

где $L_{э1}$ — эффективная яркость в момент $t = 0$, когда перестала действовать на глаз яркость L_1. Поскольку μ должно иметь размерность $с^{-1}$, сопоставленне (78) с формулами (66), (70), (71) и (74) дает

$$A(t) = e^{-\frac{t}{\vartheta}}; \tag{79}$$

$$\int_0^\infty e^{-\frac{t}{\vartheta}}\, dt = \vartheta; \tag{80}$$

$$A(\tau - t) = e^{\frac{\tau - t}{\vartheta}}; \tag{81}$$

$$K_э = \frac{K}{\vartheta}\int_0^\tau e^{-\frac{t}{\vartheta}}\, dt = K\left(1 - e^{-\frac{\tau}{\vartheta}}\right). \tag{82}$$

Результаты всех проведенных нами опытов с пороговым контрастом достаточно хорошо выражаются с помощью формул (79)—(82), которые мы называем формулами экспоненциальной зависимости. Замечательно, что формула (82) вполне соответствует формуле (62), т. е. между развитием зрительного ощущения и движением тела в вязкой среде действительно существует формальная аналогия.

58. Эффективный контраст движущегося тела

На практике эффективный контраст $K_э$ оказывается меньше контраста K чаще всего из-за быстрого движения контрастирующего объекта.

Когда наблюдается достаточно большой предмет и угловая скорость его не очень велика, глаза движутся вслед за объектом, его изображение на сетчатке сохраняется почти неподвижным и наблюдатель воспринимает его полный контраст с фоном K. Но для того чтобы взгляд начал следовать за предметом, его нужно заметить, хотя бы неясно, при неподвижном взгляде. Поэтому вопрос о пороговой видимости движущегося тела нужно решать для неподвижного взгляда [26].

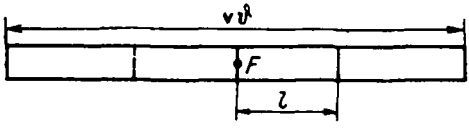


Рис. 35. Кажущееся удлинение движущегося тела

Пусть наблюдатель ожидает появления движущегося тела на поле, яркость которого L. Яркость тела L_s, длина его l, скорость v. Наблюдатель фиксирует точку F (рис. 35). Момент, когда передний край тела касается

точки F, примем за начало отсчета времени ($t = 0$). Конец тела коснется точки F в момент τ. В точке F наблюдатель длительное время до момента $t = 0$ видел фон, т. е. воспринимал действие яркости L. Только последнее время τ он воспринимал в точке F яркость $L_э$. Время τ легко вычислить. Очевидно, что

$$\tau = l/v. \tag{83}$$

Подставив (83) в (74), получим

$$K_э = \frac{K}{\vartheta} \int_0^{l/v} A(t)\, dt \tag{84}$$

или, если $l/v \ll \vartheta$,

$$K_э = K \frac{l}{v\vartheta}. \tag{85}$$

Опишем простейший эксперимент, поставленный для изучения пороговой видимости движущегося тела. Установка состоит из двух белых дисков диаметром 1300 и 250 мм. На большой диск вдоль одного из радиусов наклеено 14 черных марок шириной $d = 10$ мм и длиной $l = 1$ мм (длиной марки мы называем ее размер в направлении движения, т. е. в данном случае перпендикулярно радиусу). Каждая марка находится на своем расстоянии R от центра диска. Большой диск вращается с частотой ν (56 либо 75 об/мин).

На малый диск наклеено 5 черных марок, каждая на расстоянии r от центра, шириной тоже 10 мм, а длиной $l_м = 3$ мм. Диск вращается с частотой 100 об/с, так что каждая марка видна в виде серого кольца, эффективный контраст которого $K_э$ легко подсчитать, приняв во внимание, что контраст K неподвижной марки уменьшается во столько раз, во сколько l меньше длины окружности $2\pi r$. Итак,

$$K_э = \frac{K l_м}{2\pi r}. \tag{86}$$

Эффективный контраст движущейся марки на большом диске можно подсчитать по формуле (85), выразив скорость v через R и ν:

$$K_э = K \frac{60 l}{2\pi R \nu \vartheta}. \tag{87}$$

Над обоими дисками помещены экраны с вырезанным сектором, через который и ведется наблюдение. Наблюдателю предлагается указать, какую из марок он еще замечает на большом диске и какую на малом. Получив таким образом два радиуса R и r, мы можем считать, что оба они соответствуют пороговому контрасту ε и, следовательно, при этих радиусах можно приравнять друг другу правые части формул (86) и (87). Решение получившегося уравнения дает

$$\vartheta = \frac{60}{\nu} \frac{l}{l_м} \frac{r}{R}. \tag{88}$$

Следует заметить, что при движении тела изменяется не только его видимый контраст, но и видимая длина. Контраст K как бы размазывается на видимую длину l', которая отличается от истинной длины l на величину $v\vartheta$:

$$l' = l + v\vartheta. \tag{89}$$

Так как пороговый контраст зависит от размеров объекта, видимое удлинение движущегося тела усложняет расчеты. Чтобы уменьшить возможную ошибку, мы, во-первых, ограничивали наблюдаемую картину вырезом в экранах, а во-вторых, делали марки достаточно большими: их ширина наблюдалась под углом 1,5°. Чем больше контрастирующий объект, тем меньше его пороговый контраст зависит от размеров.

Видимость движущегося тела изучалась и другими методами [26, стр. 34—39]. В экспериментах участвовало 11 наблюдателей, что позволяло считать результаты достаточно надежными. Значение ϑ оказалось близким к ранее полученному $\vartheta = 0{,}05$ с, причем обнаружилась некоторая зависимость от яркости, которая изменялась в пределах от 40 до 1000 кд/м^2.

Во всех экспериментах с пороговым контрастом функция затухания хорошо аппроксимируется экспонентой [формула (81)].

59. Эффективный блеск

Видимость точечных источников, вспыхивающих на короткое время, давно изучалась в связи с широким применением проблесковых огней для маяков. Наиболее определенный результат дали работы Блонделя и Рея [53]. Чисто экспериментальным путем они нашли зависимость между блеском * E и длительностью проблеска точечного источника, наблюдаемого на темном фоне на пороге видимости:

$$E\tau = E_\infty(\tau + \vartheta). \tag{90}$$

Слева стоит величина, которую можно назвать экспозицией блеска. Она линейно зависит от длительности проблеска. Смысл коэффициента E_∞ легко выясняется, если мы допустим, что проблеск становится очень длительным, т. е. $\tau \gg \vartheta$. Тогда τ и $\tau + \vartheta$ можно сократить и мы получим $E = E_\infty$. Значит, E_∞ — пороговый блеск при длительном действии источника. А ϑ — время инерции (приводя формулу Блонделя и Рея, мы позволили себе изменить обозначения величин).

Подобно тому как мы ввели понятие эффективного контраста, введем понятие эффективного блеска $E_э$. По аналогии с формулой (74) напишем

$$E_э = \frac{E}{\vartheta}\int_0^\tau A(t)\,dt. \tag{91}$$

Пороговый блеск E_∞ можно считать частным случаем эффективного блеска $E_э$, поэтому есть основания предполагать, что для любого эффективного блеска будет тоже верна формула Блонделя и Рея, написаниая так:

$$E\tau = E_э(\tau + \vartheta). \tag{92}$$

Приравняв друг другу значения $E_э$, найденные по формулам (91) и (92), получим

$$\frac{1}{\vartheta}\int_0^\tau A(t)\,dt = \frac{\tau}{\tau + \vartheta}. \tag{93}$$

Теперь легко найти подынтегральную функцию — функцию затухания

$$A(t) = \frac{\vartheta^2}{(t + \vartheta)^2}. \tag{94}$$

* Блеском точечного источника называют освещенность, которую он создает на зрачке наблюдателя или на другом приемнике света.

Итак, из формулы Блонделя и Рея вытекает, что функция затухания — не экспонента, а гипербола второго порядка. Однако, прежде чем делать дальнейшие выводы, следует еще проверить допустимость применения закономерности (90), полученной Блонделем и Реем, к случаю эффективного блеска — формула (92).

60. Видимость проблесковых огней

Нами были изучены при фовеальном зрении, на темном фоне (Т) и при разных яркостях фона (Ф) величины: пороговый блеск вспышек (соответственно ПТ и ПФ) и эффективный блеск проблесков (ЭТ и ЭФ) [26]. Кроме того, пороговый блеск проблесков был измерен при периферическом зрении. Во всех опытах применялась красная фиксационная точка, отстоявшая от точек, в которых происходили вспышки при фовеальном наблюдении, на расстояние 16′, а при периферическом наблюдении — на расстояние 7°.

Установка позволяла давать либо одновременно две вспышки разной длительности и блеска, либо одну вспышку. При разной длительности вспышек они заканчивались одновременно. Результаты всех измерений укладываются в рамки линейной зависимости, т. е. подтверждают формулы (90), (92) и (94).

Пороговый блеск в темноте измерялся при двух вероятностях заметить вспышку, 50 и 80%. Значения ϑ получены соответственно 0,205 и 0,200 с, т. е. очень близкими к найденному Блонделем и Реем $\vartheta = 0{,}21$ с. Результаты пороговых наблюдений на фоне яркостью от 10^{-6} до 32 кд/м^2 (ПФ) сведены в табл. 5.

Таблица 5. **Зависимость порогового блеска E_∞ и времени инерции ϑ от яркости фона L**

L, кд/м^2	$\vartheta \cdot 10^3$, с				$E_\infty \cdot 10^2$, мклк			
	при цвете источника			среднее	при цвете источника			среднее
	белом	зеленом	красном		белом	зеленом	красном	
0	218	214	210	214	1,93	2,06	2,29	2,09
10^{-4}	212	202	197	204	1,96	2,08	2,33	2,12
10^{-3}	193	180	172	182	2,06	2,40	2,58	2,35
10^{-2}	172	170	162	168	2,27	2,70	3,02	2,66
10^{-1}	155	158	157	157	3,80	4,00	4,00	3,93
1	144	148	146	146	15,0	7,5	9,0	10,5
10	140	142	137	140	45,0	31,0	36,0	37,3
100	137	132	128	132	104	98	115	106

Для определения эффективного блеска $E_э$ на темном фоне (ЭТ) наблюдателю предъявлялись одновременно две вспышки: эталонная, блеск которой был E_i, а длительность $\tau_0 = 0{,}01$ с,

и измеряемая, длительность которой τ изменялась в каждой серии опытов от 0,01 до 2,5 с, а блеск E подбирался таким, чтобы обе вспышки наблюдатель воспринимал одинаково яркими. Конечно, измерение E с каждым наблюдателем повторяли многократно, чтобы найти среднее значение блеска. Затем находили значение E, среднее для всех наблюдателей. Отложив произведение $E\tau$ против значений τ, проводили через экспериментальные точки прямую (рис. 36). Полученная прямая выражается уравнением (92), что позволяет легко найти ее параметры $E_э$ и ϑ. Чтобы найти их графическим путем, перечертим часть графика, близкую к абсциссе $\tau = 0$, в увеличенном масштабе (рис. 36, справа). Положив в формуле (92) $E\tau = 0$, по-

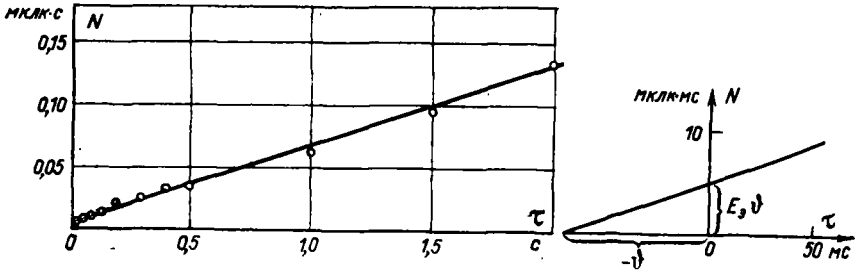


Рис. 36. График зависимости $N = E\tau$ от длительности проблеска τ

лучаем $\vartheta = -\tau$; положив $\tau = 0$*, получаем $E\tau = E_э\vartheta$. На рис. 36, справа указаны соответствующие отрезки координатных осей.

Для четырех значений эффективного блеска 0,064; 0,625; 11,3 и 28,6 мклк были найдены значения времени инерции: 0,078; 0,080; 0,044 и 0,035 с. Связь между $E_э$ и ϑ приближенно выражается формулой

$$\lg \vartheta = \bar{2},88 - 0,23 \lg E_э. \qquad (95)$$

Если даны блеск огня E и его длительность τ, эффективный блеск $E_э$ на темном фоне можно найти совместным решением уравнений (92) и (95).

Исследование эффективного блеска на фонах различной яркости L (ЭФ) было проведено для значений $E_э$, представляющих наибольший практический интерес. По международному соглашению принято считать, что ночью постоянный огонь виден до тех пор, пока блеск его не станет меньше 0,2 мклк. Назовем величину $E_{min} = 0,2$ мклк наименьшим блеском. Эта величина значительно превышает пороговый блеск E_∞, определенный в лабораторных условиях даже для не очень темного

* При $\tau \to 0$ произведение $E\tau$ остается конечным из-за неограниченного возрастания блеска E.

фона. К какой же яркости фона можно отнести официально принятую величину E_{min}? Видимо, к такой, при которой яркость фона еще не очень повышает пороговый блеск E_∞. Судя по данным табл. 5, такой яркостью можно считать $L = 0{,}003$ кд/м^2, для которой $E_\infty = 0{,}025$ мклк, и именно к ней отнести $E_{min} = 0{,}2$ мклк. Обозначив через η_E отношение минимального блеска E_{min} к пороговому E_∞, найдем, что для $L = 0{,}003$ кд/м^2 $\eta_E = 8$.

Число η_E можно назвать коэффициентом надежности. В своих экспериментах мы старались при каждой яркости фона иметь дело с таким эффективным блеском, который приблизительно в 8 раз превосходит пороговый, т. е. сохранять условие $E_э \approx 8E_\infty$.

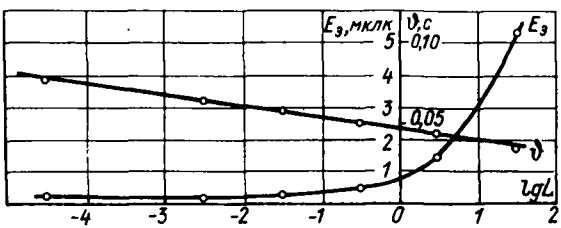


Рис. 37. Время инерции ϑ и эффективный блеск $E_э$ в зависимости от яркости фона L

Так как экспозиция блеска $E\tau$ при каждой яркости и здесь линейно зависит от длительности проблеска τ, то, построив график, легко найти $E_э$ и ϑ (рис. 37).

Эти данные не позволяют для любого сочетания E, τ и L найти $E_э$, но дают возможность оценить эту величину. Оценка заключается в том, что для данной яркости L по графику находят ϑ, а затем по формуле (92) — эффективный блеск $E_э$. Нельзя утверждать, что полученное значение $E_э$ будет точным, но можно определить, больше оно или меньше, чем $8E_\infty$, т. е. соответствует ли оно установленному коэффициенту надежности η_E.

61. Суммирование световых воздействий

Формулы линейной зависимости (90) и (92) указывают на способность зрения суммировать во времени воздействие входящего в глаз света и вместе с тем на ограниченность этой способности. За короткое время τ суммирование происходит практически полностью; чем длиннее проблеск, тем хуже суммируется свет, т. е. тем больше должна быть общая световая энергия $E\tau$ для получения порогового восприятия или заданного эффективного блеска. Критерием для выяснения вопроса, мала или велика длительность τ, служит сравнение ее со временем инерции ϑ. Рассмотрим два предельных случая.

Если $\tau \ll \vartheta$ формулы (90) и (92) дают

$$E\tau = E_\infty \vartheta \text{ и } E\tau = E_э \vartheta. \tag{96}$$

Справа стоят постоянные величины, т. е. суммирование происходит полностью, уменьшение E в несколько раз может быть скомпенсировано увеличением во столько же раз длительности τ. Формулы (96) соответствуют химическому закону Бунзена — Роско [22], согласно которому количество вещества, выделившегося в результате фотохимической реакции, пропорционально произведению интенсивности света и длительности воздействия. Применительно к зрению аналогичную закономерность называют законом Блоха.

Если $\tau \gg \vartheta$, те же формулы дают

$$E = E_\infty \text{ и } E = E_э, \tag{97}$$

т. е. результат воздействия блеска на глаз перестает зависеть от длительности воздействия. Иначе говоря, если $\tau \ll \vartheta$, глаз реагирует на световую энергию, а если $\tau \gg \vartheta$ — на световой поток (т. е. на мощность светового излучения).

Проведенные нами опыты с очень короткими (микросекунды) вспышками импульсных ламп подтвердили закон Блоха, т. е. формулы (96) [26].

Формула Блонделя и Рея (90) и аналогичная ей формула (92) хороши именно тем, что они действительны во всем диапазоне возможного изменения длительности и в предельных случаях переходят в простые, неоднократно проверенные опытом зависимости (96) и (97). Кроме того, формула Блонделя и Рея связана с закономерностями, обнаруженными в электрофизиологии. В начале нашего столетия Вейс [22] установил, что для порогового воздействия на мышцу сила тока i и длительность его действия τ должны быть связаны соотношением

$$i = \frac{a}{\tau} + b,$$

где a и b — постояниые.

Переписав формулу Вейса в виде

$$i\tau = a + b\tau, \tag{98}$$

мы замечаем, что она вполне аналогична формуле Блонделя и Рея: произведение силы тока * и его длительности при пороговом раздражении есть линейная функция длительности. Легко показать, что здесь $b = i_\infty$, т. е. току, вызывающему пороговое

* Мы отдаем себе отчет, что освещенность E пропорциональна мощности света, а сила тока i мощности не пропорциональна. Но проводим аналогию между глазом и фотоэлементом, а в фотоэлементе существует пропорциональность как раз между освещенностью и силой тока.

сокращение мышцы при длительном воздействии, а $a/b = \vartheta$, т. е. времени инерции, которое физиологи называют хронаксией.

62. Два вида функции затухания

Из формулы Блонделя и Рея (функция затухания) однозначно выводится формула (94) как уравнение гиперболы второго порядка. Такова функция затухания для всех явлений, связанных с наблюдением блеска.

Но для всех явлений, связанных с наблюдением протяженных объектов, т. е. контрастов, функция затухания аппроксимируется экспонентой (79). Нужно сказать, что, в сущности, обе кривые не очень сильно отличаются друг от друга, но статистическая обработка большого количества экспериментов все же позволяет выявить различие.

Время инерции ϑ зависит от многих факторов, но в основном от яркости фона. Приближенно эту зависимость можно выразить формулой, дающей ϑ в секундах:

$$\vartheta = 0{,}13 - 0{,}08 \operatorname{th}(\lg L + 1). \qquad (99)$$

63. Инерция и локальная адаптация

Введя в определение эффективной яркости сравнение полей переменной и постоянной яркости, мы в своих опытах никогда такого сравнения не производили. Непосредственному сравнению препятствует локальная адаптация сетчатки, что отчетливо проявилось в опытах Брока и Зульцера [22]. Эти авторы фотометрически сравнивали два равномерно рассеивающих поля 1 и 2. Поле 1 освещают лишь короткое время τ, так чтобы на нем создавалась освещенность E_1. На поле 2 подбирали такую освещенность E_2, чтобы в момент освещения поля 1 яркость обоих полей показалась наблюдателю одинаковой. Результаты таких измерений изображены на рис. 38. Поскольку коэффициент отражения ρ у полей 1 и 2 был одинаков, яркости полей 1 и 2 были пропорциональны их освещенностям. Мы видим, что при $\tau \approx$ $\approx 0{,}05$ с эффективная яркость $L_э$, создаваемая яркостью 170 относительных единиц (о. е.)*, была более 700 о. е., а эффективная

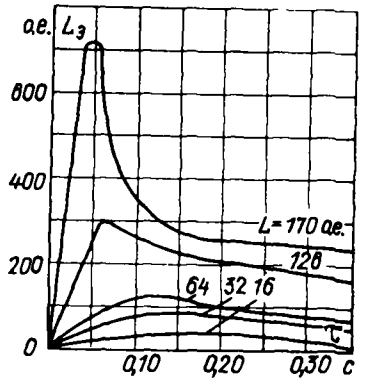


Рис. 38. График опыта Брока и Зульцера

* $L = \rho E/\pi$. Не зная ρ, мы не можем найти абсолютное значение яркостей L_1 и L_2 и выражаем их в неизвестных, но одинаковых единицах.

яркость $L_э$, создаваемая яркостью 126 о. е.,— около 300 о. е. и т. д. Мы объясняем это тем, что к моменту появления яркости L_1 яркость L_2 уже давно воздействовала на то место сетчатки, где отображено поле 2, и чувствительность здесь понизилась. Остальная площадь сетчатки сохраняла более высокую чувствительность, и кратковременное воздействие яркости поля 1 дало сильно повышенный эффект. Качественно в правильности такого объяснения можно убедиться с помощью самого простого опыта. Положите на сильно освещенную белую бумагу кусок черной бумаги площадью примерно 16 см². Смотрите в течение 30—40 с на середину черной бумаги, а затем, стараясь не поворачивать глаз, уберите ее. Вы ясно увидите на белом фоне еще более яркое пятно, которое быстро исчезнет.

Именно необходимость исключить влияние локальной адаптации заставляла нас для определения функции затухания и времени инерции избирать окольные пути. При пороговых измерениях световые воздействия на сетчатку слабы или мала разница между такими воздействиями и адаптационные изменения практически исключаются. Так исследовали мы пороговый контраст и пороговый блеск. При сверхпороговых измерениях эффективного блеска * мы сравнивали изучаемый источник с эталонным, который тоже вспыхивал на короткое время. Таковы те предосторожности, которые следует соблюдать при определении эффективных величин.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

СТРОБОСКОП

64. Диск-обтюратор

С инерцией зрения принято связывать обширный и неточно очерченный круг явлений, называемых стробоскопическими. Общее у них одно: все они связаны с прерывистым наблюдением. Способы, которыми оно достигается, очень разнообразны, и результаты весьма различны: кажущееся движение неподвижных объектов (кино), видимость нескольких объектов вместо одного (стробоскопический эффект безынерционных ламп), видимая неподвижность движущихся тел.

Для прерывистого наблюдения служит прибор, называемый стробоскопом (от греческих слов strobos — волчок, вихрь и skopeo — смотреть, наблюдать). Основная часть простейшего стробоскопа — диск-обтюратор с секторной прорезью. Диск может вращаться с частотой ν, которую можно регулировать

* При фотометрировании точечных источников локальная адаптация не очень опасна благодаря непроизвольным движениям глаз и перемещению изображения по сетчатке. Все же мы нашли полезным применить и в качестве эталона короткую вспышку.

в широких пределах. Диск ставится между подлежащей наблюдению картиной и наблюдателем или перед источником света, в результате чего картина то появляется, то исчезает с периодом T. Очевидно, что

$$T = 1/\nu. \tag{100}$$

Обозначим через φ отношение дуги, соответствующей сектору прорези, ко всей окружности диска. Тогда та часть периода, в течение которой картина видна наблюдателю, будет

$$T_1 = \varphi T. \tag{101}$$

Часть периода, в течение которой картина не видна,

$$T_2 = (1 - \varphi) T. \tag{102}$$

65. Критическая частота слияния мельканий

При практических применениях обтюратора частота вращения ν, как правило, должна быть не меньше критической частоты слияния мельканий $\nu_{кр}$. Критической частотой слияния мельканий называют частоту, при которой наблюдатель перестает видеть понижения и повышения яркости. Каждая деталь картины приобретает стабильную эффективную яркость $L_э$, которая согласно закону Тальбота [22] равна средней яркости за период T. Если $\nu \geqslant \nu_{кр}$, то

$$L_э = \varphi L, \tag{103}$$

где L — яркость детали при неподвижном, открытом обтюраторе.

Критическая частота слияния мельканий $\nu_{кр}$ зависит от многих факторов. Укажем хотя бы некоторые из них:

1. Яркость L наблюдаемой картины.
2. Отношение φ светлой части периода T_1 ко всему периоду T.
3. Глубина модуляций яркости при мельканиях (амплитуда модуляций)

$$a_м = \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2},$$

где L_1 и L_2 — максимальная и минимальная яркость при мельканиях. В простейшем случае $L_2 = 0$ и $a_м = 1$. Но это только частный случай.

4. Угловой размер поля зрения.
5. Форма кривой, выражающей повышение и понижение яркости в процессе мельканий. Создать мгновенный переход от L_1 к L_2 практически невозможно, и форма кривой, описывающей модуляции, может только приближаться к П-образной. Иногда же умышленно создают модуляции более сложной формы, например, синусоидальные.

Дать единую формулу, определяющую $\nu_{кр}$ в зависимости от пяти перечисленных параметров, пока не представляется возможным. Приведем здесь формулы двух частных случаев,

выражающих зависимость $\nu_{кр}$ при П-образных световых импульсах, из работ Портера [22] и Айвса [14]. Именно работы Портера, и в особенности Айвса, используются обычно для практических расчетов, например, в кинотехнике [14].

При $\varphi = {}^1/_2$

$$\nu_{кр} = 12{,}4 \lg a_м L + 39{,}5. \tag{104}$$

При $a = {}^1/_2$ и любом φ

$$\nu_{кр} = 12{,}4 \lg Lf(\varphi) + 44{,}4. \tag{105}$$

Здесь $\nu(\varphi)$ — некоторая функция φ, которую Айвс изображает графически и которую приближенно можно представить так:

$$\nu_{кр}(\varphi) = 0{,}58[\varphi(1-\varphi)] + [\varphi(1-\varphi)]^2. \tag{106}$$

Из формулы видно, что $\nu_{кр}$ симметрична относительно значения $\varphi = 0{,}5$, т. е. что, например, обтюраторы, у одного из которых $\varphi = 0{,}2$, а у другого $\varphi = 0{,}8$, должны давать одинаковую критическую частоту. Еще раньше Плато [22] назвал такие диски дополнительными и заметил, что им соответствует одинаковая критическая частота.

Де Ланге исследовал зависимость критической частоты от амплитуды $a_м$ в широких пределах, начиная с очень малых амплитуд [56]. При яркости приблизительно 60 кд/м^2 на графике обнаружилась интересная особенность: частоте $\nu_{кр} = 9\,с^{-1}$ соответствует минимум амплитуды $a_м = 0{,}008$. При яркости около 5 кд/м^2 минимум выражен слабее, а при яркости 0,4 кд/м^2 его совсем нет. При частоте 1 с$^{-1}$ все кривые сходятся в точке $a_м = 0{,}0135$.

Наличие минимума амплитуды при небольших частотах можно объяснить свойствами амплитудно-частотной характеристики сглаживающего фильтра в зрительной системе (см., например, [26], стр. 47, 48, [21]). Следует обратить внимание на то, что при частоте, близкой к 9 с$^{-1}$, глаз способен обнаруживать очень малое изменение яркости: оно меньше порогового контраста во времени, найденного нами экспериментально при единичных скачкообразных изменениях яркости [26]. Быть может, есть смысл применять частоты, близкие к тем, которые дают минимум амплитуды $a_м$ для уточнения процесса визуального фотометрирования.

66. Наблюдение периодических процессов

Стробоскоп работает, как правило, при частотах, превышающих критическую, так что наблюдатель мельканий не замечает. Чаще всего стробоскоп применяется для наблюдения периодических процессов и задача наблюдателя состоит в том, чтобы добиться совпадения периодов стробоскопа и наблюдаемого

процесса. Иногда, впрочем, периоды могут не совпадать, а находиться в простом кратном соотношении.

Предположим, стробоскоп состоит из диска с узкой секторной шелью, причем частоту вращения диска можно плавно менять и на шкале прибора видеть, чему равно ν. Пусть нужно измерить скорость вращения двигателя внутреннего сгорания, наблюдая движение его шатуна. Смотря через диск, повышают частоту вращения ν и наконец начинают видеть шатун, медленно двигающийся в поле зрения. Теперь, медленно варьируя скорость, находят такую частоту, при которой шатун виден неподвижным (или почти неподвижным). Это означает, что периоды вращения двигателя и стробоскопа совпадают и взгляд через щель застает шатун всегда в одном и том же положении, почему он и кажется неподвижным.

Заметим, однако, что если скорость диска-обтюратора будет вдвое больше скорости двигателя, шатун тоже будет казаться неподвижным, но щель будет заставать его в двух фазах движения — наблюдатель будет видеть два шатуна. Чтобы получить правильные результаты стробоскопических измерений, нужно уметь анализировать наблюдаемую картину.

Взглянув на формулу (101), мы видим, что время T_1, в течение которого обтюратор открыт, пропорционально φ. Следовательно, чем больше вырез диска, тем сильнее успевает сместиться объект за время однократного наблюдения, тем больше будет он оптически размазан. Но если сделать φ очень малым, мы сильно снизим эффективную яркость картины [см. формулу (103)]. Да и вообще, при любом устройстве обтюратора мы используем только φ-ю часть световой энергии источника света. Такой недостаток устранен в стробоскопах без обтюратора, в которых прерывистое наблюдение обеспечивается применением импульсных источников света, периодически вспыхивающих с частотой ν, которую можно варьировать в широких пределах. Длительность каждой вспышки может измеряться несколькими микросекундами, а если применить лазер, то и наносекуидами.

При стробоскопическом наблюдении предмета, совершающего периодическое движение, когда уже достигнуто совпадение периодов его движения и вспышек света, предмет виден всегда в одной и той же фазе его движения. В промежутках между вспышками наблюдатель «видит» темноту: изображение на сетчатке не засвечивается постороним светом. Поэтому наблюдатель воспринимает полный контраст объекта, т. е. в этом случае $K_э = K$.

67. Наблюдение тела, движущегося поступательно

Иначе обстоит дело при стробоскопическом наблюдении за непериодическим процессом, например за телом, движущимся поступательно.

Пусть мы наблюдаем тело длиною l, движущееся со скоростью v через

обтюратор со щелью в виде сектора с угловым размером φ (в радианах). Иначе говоря, за один оборот диска с периодом вращения T мы видим наблюдаемую картину только в течение времени T_1, причем $T_1 = \varphi T$.

Эффективный контраст $K'_э$, наблюдаемый за одно прохождение щели, легко найти, подставив в формулу (85) вместо времени инерции ϑ более короткое время T_1:

$$K'_э = K \frac{l}{vT_1}. \tag{107}$$

Однако формула (107) дает преувеличенное значение эффективного контраста. Дело в том, что за время инерции ϑ щель перед глазом пройдет не один, а несколько раз. Обозначив через m число прохождений щели за время ϑ, получим $m = \vartheta/T$. За m прохождений щели в данном месте мы только один раз будем видеть тело (контраст $K'_э$), а остальные $m - 1$ раз — фон. Поэтому фактически наблюдаемый контраст $K_э$ будет в m раз меньше, чем $K'_э$:

$$K_э = K \frac{lT}{v\vartheta T_1}; \tag{108}$$

но $T/T_1 = 1/\varphi$, поэтому

$$K_э = K \frac{l}{v\vartheta\varphi}. \tag{109}$$

Из пяти величин в правой части формулы (109) только одна зависит от устройства и режима работы обтюратора — φ. Очевидно, для увеличения эффективного контраста $K_э$, т. е. для улучшения видимости движущегося тела, нужно уменьшить φ — сузить щель обтюратора. Однако таким способом нельзя безгранично увеличивать $K_э$. Прежде всего, формула (109) получена из приближенной формулы (85), пределы применимости которой были указаны при ее выводе. Эти ограничения сохраняются и для формулы (109), приобретая форму условия, что за время прохождения щели обтюратора T_1 тело должно продвинуться больше чем на свою длину l, т. е. $vT_1 > l$. Но $T_1 = T\varphi$, откуда $\varphi > l/(vT)$.

При нарушении этого условия формула (109) неприменима и уменьшение φ уже не увеличивает эффективного контраста. А чрезмерное уменьшение φ невыгодно, так как эффективная яркость наблюдаемой картины при сужении щели уменьшается, поскольку $L_э = L\varphi$.

Подробно вопрос о стробоскопическом наблюдении непериодического процесса рассмотрен в монографии [26].

68. Стробоскопический эффект газоразрядных ламп

Среди электрических источников света имеется большой класс газоразрядных ламп. Их излучение практически безынерционно, а потому при переменном токе сопровождается пульсацией светового потока, которая может порождать стробоскопический эффект. При частоте переменного тока 50 Гц свет источника 100 раз в секунду прерывается полной темнотой. Хотя частота ν при этом выше критической, а следовательно, мелькания яркости освещаемых предметов не наблюдается, при наличии в поле зрения движущихся тел стробоскопическое явление хорошо заметно. Моменты излучения застают предмет в разных точках его движения, и благодаря инерции зрения человек видит одновременно несколько рядом лежащих изо-

бражений предмета. Пульсирующее освещение вызывает повышенное зрительное утомление, а работы с движущимися частями механизмов даже опасны.

Укажем, впрочем, что иногда стробоскопичность освещения находит удачное применение. Феерический эффект создают, например, танцы на затемненной сцене в расписанных светящимися красками костюмах, если сцена освещена фильтрованным ультрафиолетовым светом газоразрядных ламп. Краски при этом тоже должны быть по возможности безынерционными.

В широко применяемых осветительных лампах световые пульсации сглажены до допустимых пределов: в лампах накаливания вследствие большой тепловой и световой инерции тела накала; в люминесцентных и некоторых других газоразрядных лампах благодаря двум обстоятельствам: инерционности люминофоров, покрывающих колбы ламп, и применению пускорегулирующей аппаратуры, сдвигающей во времени пульсации светового потока в разных лампах осветительной установки. Более радикально можно подавить стробоскопический эффект люминесцентных ламп увеличением частоты питающего тока.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ЯРКОСТЬ И ОСТРОТА ЗРЕНИЯ

69. Квантовые флуктуации света

В гл. 2 упоминалось о том, что острота зрения соответствует дифракционной формуле, т. е. зрение полностью использует возможности, предоставляемые ему волновой природой света. Однако известно, что острота зрения уменьшается с падением яркости наблюдаемой картины и становится значительно ниже предела, обусловленного дифракционной формулой, в которую яркость вообще не входит.

Чтобы найти зависимость остроты зрения или разрешающей способности любого зрительного устройства от яркости, нужно учесть корпускулярную природу света. Светотехника обычно оперирует такими понятиями, как постоянный световой поток, постоянная яркость, постоянная освещенность и т. д. Однако следует помнить, что о постоянстве любой фотометрической величины можно говорить только в среднем и всегда в известных границах.

Предположим, что монохроматическая энергетическая освещенность E, которую мы считаем одинаковой на всей площади и постоянной во времени, создана на площади σ с коэффициентом поглощения a. Энергия, поглощаемая на поверхности за время t, очевидно дается выражением

$$Q = Ea\sigma t. \qquad (110)$$

Разобьем время t на ряд равных промежутков t_1, t_2, ..., t_i и будем измерять Q_i за каждый промежуток. Как бы ни была постоянна с макроскопической точки зрения освещенность E, при достаточно малых интервалах t_i мы заметим, что Q_i не равны между собой и освещенность, вычисленная по формуле

$$E_i = \frac{Q_i}{\sigma a t_i}, \tag{111}$$

уже не постоянная величина.

Не получим мы постоянного значения E_i и в том случае, если разобьем площадь на множество равных малых площадок σ_i и найдем соответствующие этим площадкам значения Q_i.

Измерив m значений энергии Q_i за каждый из интервалов времени t_i, мы сможем вычислить среднее значение энергии по формуле

$$\bar{Q} = \frac{1}{m} \sum^{m} Q_i; \tag{112}$$

Q_i отличается от $\bar{Q}$ в среднем на величину ΔQ, которая определяется формулой

$$(\Delta Q)^2 = \frac{1}{m} \sum_{1}^{m} (Q_i - \bar{Q})^2. \tag{113}$$

Величину ΔQ можно назвать средней квадратичной флуктуацией. Как бы тщательно мы ни стремились отмерить одинаковые порции световой энергии Q_i, они всегда будут отличаться друг от друга, хотя бы из-за наличия флуктуаций света.

С. И. Вавилов [5] указывает, что флуктуации света вызываются отчасти причинами, известными уже из классической физики, отчасти квантовой природой света. Но во всех практически используемых источниках света основную роль играют только квантовые флуктуации, для которых

$$(\Delta Q)^2 = h\nu Q, \tag{114}$$

где h — постоянная Планка, ν — частота света. Поскольку $h\nu$ — энергия одного кванта, то

$$Q = nh\nu, \tag{115}$$

где n — число квантов, а

$$\Delta Q = h\nu \Delta n. \tag{116}$$

Подставив (115) и (116) в (114), получим

$$\Delta n = \sqrt{n}. \tag{117}$$

Чем больше порция световой энергии, тем больше ее средняя квадратичная флуктуация. Но все наши приборы работают с некоторой относительной погрешностью и измеряют величину с точностью, ограничиваемой этой относительной погрешностью.

Поэтому для любого прибора, в том числе и для глаза, существенна не абсолютная величина Δn, а отношение ее к числу квантов n, т. е. относительная квантовая флуктуация $\Delta n/n$. Разделив обе части (117) на n, получаем

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}}. \tag{118}$$

Относительная квантовая флуктуация уменьшается с увеличением общего числа фотонов n. Поэтому в обычных световых измерениях мы не улавливаем этих флуктуаций. Достаточно сказать, что в потоке 1 лм за секунду пролетает около $2 \cdot 10^{16}$ квантов, следовательно, относительная кваитовая флуктуация равна $1{,}4 \cdot 10^{-8}$, т. е. немногим более стомиллионной. Никакой фотометр не может уловить столь малой величины. Но если n становится малым, квантовые флуктуации могут оказаться весьма заметными, причем совершенно не имеет значения, что определяет малую величину n: малая освещенность, малое поглощение, малая площадь или малая длительность [см. формулу (110)].

70. Опыты С. И. Вавилова

В классических опытах С. И. Вавилова и его сотрудников [5, 6] малое число квантов n обуславливалось малым размером источника света (3 или 6′), небольшой его яркостью, краткостью световой вспышки (0,1 с) и введением поглощающих светофильтров. Наблюдения велись в полной темноте после длительной темновой адаптации. Экспериментально определялась вероятность увидеть вспышку в зависимости от среднего числа n фотонов в ней. Число n заранее неизвестно, но оно пропорционально яркости вспышки:

$$n = gL, \tag{119}$$

где g — постоянный коэффициент.

При среднем числе n, получаемом от отдельной вспышки, фактически поглощается z фотонов. Вероятность для каждого значения z определяется формулой Пуассона

$$W(z) = \frac{n^z}{e^n z!}. \tag{120}$$

Предполагается существование порогового числа фотонов n_0. Если $z \geqslant n_0$, вспышка замечена, если $z < n_0$, вспышка не видна. Следовательно, чтобы рассчитать вероятность увидеть вспышку $W(z \geqslant n_0)$, достаточно просуммировать вероятности $W(z)$ от n_0 до бесконечности:

$$W(z \geqslant n_0) = \sum_{z=n_0}^{\infty} \frac{n^z}{e^n z!}. \tag{121}$$

Обратим внимание на то, что $W(z \geqslant n_0)$ при заданном параметре n_0 есть фуикция только среднего числа квантов n. Вычислив при $n_0 = 1$, 2, 3 и т. д. зиачеиия $W(z \geqslant n_0)$, можно построить семейство этих кривых. По оси абсцисс при этом следует откладывать не n, а $\lg n$. Это позволяет сравнивать вычисленные кривые с экспериментальными. В самом деле, логарифмируя формулу (119), получаем $\lg n = \lg g + \lg L$. Значит, переход от аргумента n к аргументу L сводится к прибавлению постоянного слагаемого, т. е. к смещению кривой вдоль оси абсцисс без изменения ее формы. Подобрав для каждой эксперимеитальной кривой наиболее близкую к ней теоретическую кривую, удавалось определить параметр n_0 для данного наблюдателя.

Характер найденных статистических зависимостей соответствует формуле Пуассона, что подтверждает предположение о квантовых флуктуациях в числе поглощаемых квантов. Пороговое число квантов n_0 для разных наблюдателей колебалось в пределах от 8 до 50 (в отдельиых случаях оно оказывалось близким к двум). В пределах λ от 500 до 600 нм по данным С. И. Вавилова и его сотрудников n_0 не зависит от длины волны. Н. И. Пинегин несколько позже показал ту же независимость n_0 от длины волны в гораздо более широком диапазоне — от 405 до 700 нм.

В этом как раз и заключается достоинство метода С. И. Вавилова: весь расчет идет иа уровне активно поглощенных квантов. Для фотонов синего или красного света вероятность активного поглощения меньше, чем для фотонов зеленого. Но если уж фотон поглощен, его качество не имеет значения.

Хехт [38] нашел, что $n_0 = 5$; 6 или 7. Боуман и Ван дер Вельден утверждают, что $n = 2$ и даже строят на этой основе двуквантовую теорию зрительного процесса [38].

71. Квантовые флуктуации и разрешающая способность зрительного прибора

Работами С. И. Вавилова и других авторов было несомненно доказано, что глаз в некоторых условиях способен чувствовать действие столь малого числа квантов, что становится вполне заметной роль квантовых флуктуаций. В 1943 г. акад. А. А. Лебедев высказал мысль, что кваитовые флуктуации должны сказываться и при довольио высоких уровнях яркости, ограничивая разрешающую способность зрительных приборов, в том числе, коиечно, и глаза. Эта идея была нами разработана теоретически и экспериментально [26].

Как мы уже говорили, квантовые флуктуации заметны в тех случаях, когда порция света мала, т. е. мало среднее число действующих фотонов n. Но для этого совсем не должна быть мала освещенность. На фотопленке, например, зачастую необходимо получить изображение с большим числом деталей (а зна-

чит, элементы изображеиия малой площади) при малой выдержке. Следовательно, даже при значительной освещенности E сомножители σ и t могут быть настолько малы, что малой окажется и порция световой энергии Q [см. формулу (110)], а следовательно, и n. Нужно помнить, что для различения некоторой детали изображеиия площадью σ важен ее контраст с фоном K, определяемый формулой (72). Выделим рядом с объектом, площадь которого σ, такой же по площади элемент фона и сравним две порции световой энергии Q_s и Q, получаемые зрительным прибором от объекта и от фона. Учитывая, что освещенность на приемнике зрительного прибора пропорциональна яркости соответствующих частей поля зрения, мы можем на основе формулы (119) привести формулу (72) к такому виду:

$$K = \frac{n - n_s}{n}, \qquad (122)$$

где n_s и n — средние значения числа квантов, которые поглощаются на изображении объекта и равного по площади элемента фона. Нужно подчеркнуть, что n_s и n — средние числа за время ϑ, в течение которого прибор может собирать и иакоплять воздействие фотонов (например, выдержка фотоаппарата, время инерции зрения и т. п.). Истинные числа квантов z_s и z могут значительно отличаться от n_s и n [см. формулу (120)]. Поэтому формула (122) дает только среднее значение контраста, а для получения некоторого истинного контраста K' вместо n_s и n нужно подставлять z_s и z.

Приведем такой пример. Пусть $n = 1225$, а $n_s = 784$; при этом $K = 0{,}36$.

Для оценки K' возьмем неблагоприятный случай, когда флуктуации уменьшают n и увеличивают n_s, уменьшая разницу между ними. Согласно формуле (117)

$$\Delta n = \sqrt{1225} = 35; \quad \Delta n_s = \sqrt{784} = 28;$$
$$z = n - \Delta n = 1190; \quad z_s = n_s + \Delta n_s = 812;$$
$$K' = \frac{1190 - 812}{1190} = 0{,}32.$$

Контраст изменился незначительно.

Допустим, что вследствие падения освещенности n и n_s уменьшились в 49 раз. Теперь $n = 25$; $n_s = 16$. Как и раньше $K = 0{,}36$. Но

$$\Delta n = \sqrt{25} = 5; \quad \Delta n_s = \sqrt{16} = 4;$$
$$z = 25 - 5 = 20; \quad z_s = 16 + 4 = 20;$$
$$K' = \frac{20 - 20}{20} = 0.$$

Контраст K стал величиной колеблющейся, неустойчивой, временами доходящей до нуля. Улавливать его, т. е.

обнаруживать контрастирующий объект, становится трудно, а быть может, уже и невозможно.

Мы видели, что неустойчивость контраста возрастает с уменьшением n. Очевидно, должно существовать такое минимальное пороговое значение n_1, при котором едва улавливается объект даже со 100%-ным контрастом, $K = 1$.

Назовем δ_1 угловой размер (в радианах) едва различаемого при $K = 1$ объекта, d — диаметр зрачка глаза (в метрах), L — яркость фона (в кд/м^2), a_1 — максимальный коэффициент активного поглощения, т. е. отношение поглощенного рецепторами сетчатки потока к потоку, вошедшему в глаз, для света, у которого $V(\lambda)$ максимально. Можно рассчитать ([26], стр. 74—77), что

$$n_1 = Ma_1\vartheta d^2 L\delta_1^2, \qquad (123)$$

где M — коэффициент для перевода световой энергии в число фотонов. Расчет показывает, что для дневного (фотопического) зрения $M_\Phi = 16{,}8 \cdot 10^{14}$ лм$^{-1}\cdot$с$^{-1}$; для ночного или сумеречного зрения $M_c = 7{,}0 \cdot 10^{14}$ лм$^{-1}\cdot$с$^{-1}$.

Если бы n_1 было известно, предельный угол δ в зависимости от яркости L можно было бы найти по формуле (123). Мы пошли сначала обратным путем и, воспользовавшись литературными данными для a_1 [5, 38], d [22, 35], ϑ [26] и δ [11], приблизительно оценили значение числа n_1. Оценка дала $n_1 \approx 10$. Интересно отметить, что при изменении яркости в 100 000 раз для сохранения постоянства n_1 величина a_1 должна изменяться только в 20 раз: от 0,2 при самой малой яркости ($3 \cdot 10^{-5}$ кд/м^2) до 0,01 при яркости 3 кд/м^2.

Для уточнения величины n_1 были проведены модельные опыты. Тест-объект был выполнен в виде квадратика из черной бумаги размером в 7,3′, наклеенного на матовое стекло. Матовое стекло освещалось проецированием на него двух дисков со множеством беспорядочно расположенных отверстий. Диски вращались в противоположные стороны, при совпадении отверстий на матовом стекле происходила вспышка: на короткое время появлялось светлое пятнышко. Чем быстрее вращались диски, тем больше в единицу времени происходило вспышек на единице площади стекла и тем лучше становился виден квадратик. При этом яркость матового стекла, усредненная по поверхности и по времени, оставалась постоянной. Определяли ту скорость вращения дисков, при которой наблюдатель едва различал марку. Правильность его ответов контролировалась тем, что он должен был указать положение квадратика по отношению к центру круглого матового стекла: вверху, внизу, справа и слева. Наблюдения проводились при двух средних яркостях и двух длительностях наблюдения: 3 и 1,5 с. Время наблюдения почти не влияло на результаты, так как основное значение имеет число вспышек не за все время наблюдения, а за время инерции ϑ, в течение которого глаз усредняет воздействие вспы-

шек. Результат экспериментального определения среднего числа вспышек, которые должны происходить на площади фона, равной площади квадратика, за время инерции ϑ, чтобы объект со стопроцентным контрастом (черный квадратик) различался на пороге видимости, был $n_1 = 5$.

Роуз, создавая поле модельного наблюдения на экране электронного устройства, получил $n_1 = 25$ [42]. Однако Роуз считал, что $\vartheta = 0{,}2$ с, а это в 3—4 раза превосходит принятую нами величину 0,05—0,06 с, основанную на целом ряде специальных исследований (сводка их в [26]). Если соответствующим образом пересчитать результаты Роуза, мы получим, что и у него n_1 лежит в пределах от 6 до 8. А поскольку при вычислении δ_1 по формуле (123) n_1 входит в степени половина, можно, не рискуя ошибиться, принять $\sqrt{n_1} = 2{,}5$.

Теперь следует перейти от n_1 — числа квантов, необходимого для различения объекта с контрастом $K = 1$, к n — числу квантов, необходимому для различения объекта с любым контрастом K. Если $K \neq 1$, с площади изображения объекта на сетчатке за время ϑ поглощается n_s квантов (при $K = 1$ $n_s = 0$). Для различения объекта на равном ему по площади элементе фона, от которого глаз поглощает n квантов, необходимо, чтобы разность $n - n_s$ была достаточно велика. Она должна не менее, чем в некоторое число b раз, превышать среднюю вероятную флуктуацию, которая равна $\sqrt{n}$. Таким образом, пороговое условие

$$n - n_s = b\sqrt{n}. \tag{124}$$

(По существу, b — отношение сигнала к шуму.) Разделив обе части равенства (124) на n, получим

$$K = b/\sqrt{n}. \tag{125}$$

Поскольку при $n = n_1$ $K = 1$, то $1 = b/\sqrt{n_1}$, откуда $b = \sqrt{n_1}$, а

$$n = n_1/K^2. \tag{126}$$

При любом контрасте K для различения объекта с угловым размером δ требуется n квантов.

Формулу (123) следует переписать в виде

$$n = Ma_1\vartheta d^2L\delta^2. \tag{127}$$

Подставив в (127) значение n по формуле (126), решим полученное уравнение для предельного угла

$$\delta = \frac{\sqrt{n_1}}{Kd\sqrt{Ma_1\vartheta L}}. \tag{128}$$

Следует заметить, что формула (128) универсальна. Она годится не только для глаза, а для любого зрительного устройства, т. е. для прибора, строящего изображение: для телескопа, фотоаппарата, электронно-оптического преобразователя.

В зависимости от приемника света в приборе его спектральную чувствительность следует учитывать определенными значениями M и a_1; время, в течение которого суммируются кванты (выдержка при фотосъемке, инерция фосфора), задается параметром ϑ. Вместо d следует, конечно, подставить D — диаметр входного зрачка. Обозначив

$$\frac{\sqrt{n_1}}{\sqrt{Ma_1}} = m_s, \tag{129}$$

получим

$$\delta = \frac{m_s}{DK\sqrt{\vartheta L}}. \tag{130}$$

Выражение (130) можно назвать флуктуационной формулой для предельного угла, разрешаемого любым зрительным прибором. Сравнив ее с дифракционной формулой (2), видим, что в обе формулы диаметр входного зрачка входит одинаково: согласно обеим предельный угол обратно пропорционален диаметру входного зрачка. Но во флуктуационной формуле появились яркость L и контраст K, от которых дифракционный угол разрешения не зависит. Практически вычислять δ для глаза по формулам (129) и (130) трудно, так как в них M, a_1, ϑ и D (т. е. d_r) зависят от яркости.

Для $K = 1$ мы вывели полуэмпирическую формулу, основываясь на следующих соображениях. Согласно формуле (130) предельный угол δ должен уменьшаться пропорционально корню квадратному из яркости, иначе говоря, угол δ пропорционален $L^{-0,5}$. Однако в органе зрения с падением яркости происходит ряд компенсирующих процессов: усиление концентрации светочувствительных веществ, т. е. возрастание a_1, расширение зрачка, увеличение времени инерции ϑ. Из формул (129) и (130) легко видеть, что при падении яркости все эти процессы замедляют рост δ. Формально такое замедление можно учесть, уменьшив степень яркости, т. е. поставив вместо $^1/_2$ некоторую степень γ. Затем следует принять во внимание, что вследствие структуры сетчатки с ростом L предельный угол δ не может уменьшаться безгранично: он не может стать меньше размера структурного элемента сетчатки δ_0.

Таким образом, теоретические соображения обусловили такой вид формулы:

$$\delta_1 = \delta_0 + aL^{-\gamma}. \tag{131}$$

Постоянные δ_0, a и γ были найдены путем обработки экспериментальных данных Гершуна [11], Литго, Раутиана и Пинегина [41]. В результате была получена формула [30], дающая предельный угол в минутах:

$$\delta_1 = 0{,}45 + 0{,}64L^{-0,42}. \tag{132}$$

Рассмотрение вопроса на квантовом уровне позволило установить важную для практики зависимость между предельно разрешимым углом δ_1 и яркостью фона L.

72. Биологическая роль инерции зрения

Острота зрения V есть величина, обратная предельному углу δ. Из формулы (128) видно, что

$$V = \frac{MKd_r\sqrt{a_1\vartheta L}}{\sqrt{n_1}}. \qquad (133)$$

Обратим внимание на то, что время инерции стоит в числителе. Инерционность зрения мешает наблюдению кратковременных или быстро развивающихся процессов. Но она совершенно необходима для того, чтобы мы вообще могли различать детали, т. е. не просто воспринимать свет, а видеть. В единичном зрительном акте должно быть использовано не слишком малое число фотонов, чтобы флуктуации их не обратили наблюдаемую картину в хаос. Повышение остроты зрения означает уменьшение площади σ различаемой детали (которая пропорциональна δ^2), а это уменьшение можно компенсировать увеличением времени суммирования, т. е. ϑ. Для того чтобы обеспечить заданное число квантов n, должно соблюдаться (при неизменности остальных параметров) условие $\delta^2\vartheta = C^2$, где C — константа, или $V = \sqrt{\vartheta}/C$. При повышении яркости, как известно, ϑ уменьшается, так как, чем больше яркость, тем легче собрать нужное число квантов на разрешаемом элементе. Но если бы ϑ стало близким к нулю, к нулю приблизилась бы и разрешающая способность глаза.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ПОРОГОВЫЕ УСЛОВИЯ

73. Система зрительных функций

Зрение человека обычно характеризуют несколькими функциями, прежде всего тремя: световой чувствительностью, контрастной чувствительностью и остротой зрения. Чаще, впрочем, приводят обратные величины (иногда и не оговаривая этого): пороговую яркость, пороговый контраст, предельный угол разрешения. Все три величины зависят друг от друга, и рассматривать каждую из них изолированно нецелесообразно. Верно ли, например, утверждение, что предельный угол разрешения равен тридцати пяти секундам? Это приблизительно верно для тест-объекта с контрастом, близким к единице, и при высокой яркости, при которой ее изменения уже мало влияют на остроту зрения. Вообще же предельный угол разрешения —

функция контраста и яркости фона (точнее говоря, функция по крайней мере, этих двух параметров). Следовательно, даже в простейшем случае должна быть найдена взаимозависимость типа

$$\delta = f(L, K) \text{ или } K = F(L, \delta), \tag{134}$$

где f и F — некоторые функции стоящих в скобках величин. Однако лучше, чтобы показать равноправность величин L, K и δ найти функцию, связывающую все эти величины, типа

$$\Phi(L, K, \delta) = 0. \tag{135}$$

Геометрически функция (135) может быть представлена как поверхность в трехмерном пространстве с осями L, K и δ. Если точка лежит ниже этой поверхности, объект невидим, а если выше — виден. Сама поверхность соответствует условиям пороговой видимости, определяет пороговые условия.

Если объект появляется на короткое время τ, оно тоже должно учитываться при определении пороговых условий, которые станут уже поверхностью в четырехмерном пространстве. При более строгом подходе следует ввести еще вероятность увидеть объект, что сделает пространство уже пятимерным. Но во всех случаях пороговые условия можно (по крайней мере, принципиально) выразить функцией типа (135) с тем или иным числом взаимосвязанных переменных.

Аналогичные пороговые условия определяют и видимость точечных источников света или проблесковых огней.

74. Пороговая видимость протяженного объекта

Выведенная нами формула (132) дает связь между предельным углом и яркостью при контрасте, равном единице, т. е. связь между δ_1 и L. Следует решить, как ввести в формулу контраст K, отличный от единицы, т. е. определить взаимосвязь типа (134).

Н. Г. Болдырев [2] построил теорию пороговых условий видимости, которую он назвал энергетической. Основное положение этой теории заключается в том, что для того, чтобы сигнал был воспринят, его энергия должна быть не меньше некоторого минимального (порогового) значения. Обработка с помощью энергетической теории некоторых экспериментальных данных показала хорошее согласие теории с экспериментом [3].

По энергетической теории в пороговых условиях соотношение между контрастом и размером объекта при постоянной яркости фона выражается формулой

$$(K - \varepsilon)\delta^2 = C_э, \tag{136}$$

где ε — пороговый контраст большого объекта, $C_э$ — некоторая постоянная энергетической теории при данной яркости фона,

Если $K \gg \varepsilon$, можно написать приближенную формулу

$$K\delta^2 = C_2, \tag{137}$$

которая аналогична закону Рикко [22] для световой чувствительности, где на месте K стоит L — яркость источника света.

Квантовая теория, это явствует из сопоставления формул (126)—(130), дает [26, 42] аналог закона Пиппера [22]

$$K\delta = \delta_1. \tag{138}$$

Однако формулы (136) и (137) обе осиованы иа чисто физических законах. В них не учтены особенности строения и работы глаза, прежде всего дискретная структура сетчатки и ограниченная способность суммирования световых воздействий по площади. Неполнота пространственного суммирования учтена Болдыревым величиной ε, которая вычитается из K, что и приближает расчеты к экспериментальным результатам.

Если же ограничиваться только выбором показателя степени при δ, приходится констатировать, что ни первая, ни вторая степень не может удовлетворять экспериментальным данным в широкой области изменения предельных углов, контрастов и яркостей фона. Более соответствующий эксперименту показатель степени лежит где-то между единицей и двумя.

Вейнберг [7] на основе обработки своих экспериментов и литературных данных предложил формулу, которую можио представить в виде

$$K\delta^{1,5} = \delta_1^{1,5}. \tag{139}$$

Сам Вейнберг указывает, что при малых яркостях наблюдаются отклонения от его формулы. Кроме того, она явно непригодиа, когда K становится меньше порогового контраста ε, тогда объект не виден даже при очень большом его размере. До некоторой степени этот недостаток формулы (138) можно уменьшить способом, аналогичным тому, которым воспользовался Н. Г. Болдырев [см. формулу (136)]. Коиечно, ε — величина, зависящая от яркости. Однако зависимость от яркости в основном учтена значением угла δ_1 [см. формулу (132)]. Поэтому для приближеиных вычислений вместо ε можно взять постоянное число 0,02, близкое к значению порогового контраста при высоких яркостях. Таким образом приходим к формуле предельного угла (в минутах)

$$\delta = \frac{0{,}44 + 0{,}69L^{-0{,}42}}{(K - 0{,}02)^{2/3}}. \tag{140}$$

Коэффициенты в числителе несколько отличаются от коэффициентов формулы (132), так как при $K = 1$ должно выполняться условие $\delta = \delta_1$. Формула (140) не может претендовать на большую точность, но для ориентировочных расчетов она пригодна, пока $K > \varepsilon$.

Формула (140) может быть использована только в случаях, когда время наблюдения неограниченно. Если же время наблюдения τ невелико, оно начинает влиять на пороговые условия и должно быть введено в соответствующую формулу. Очевидно, τ перестает влиять на величину δ в тех случаях, когда $\tau \gg \vartheta$. Расчет по формуле (82) показывает, что уже при $\tau = 4\vartheta$ эффективный контраст $K_э$ только на 2% меньше контраста K. Значит, если время наблюдения больше секунды, формулой (140) можно пользоваться без всяких поправок. Если же τ составляет доли секунды, учет времени экспозиции необходим.

Время наблюдения τ может влиять на восприятие и яркости L, и контраста K. Рассмотрим два предельных случая: в первом изменяется только эффективная яркость, во втором — только эффективный контраст. Если глаза наблюдателя все время погружены в темноту (все время «видят» темноту), а потом на время τ появляются и фон и объект, в формулу (140) вместо яркости L следует ставить эффективную яркость $L_э$, которую можно рассчитать по формуле

$$L_э = L(1 - e^{-\tau/\vartheta}). \qquad (141)$$

Значение ϑ нужно брать для самой малой яркости (темнота), к которой адаптировался наблюдатель до появления объекта и фона. Если $\tau \ll \vartheta$, можно воспользоваться упрощенной формулой, аналогичной формуле (76):

$$L_э = L\tau/\vartheta, \qquad (142)$$

но, как показал опыт (см. [26], стр. 99), в формулу (140) следует поставить не $L_э$, а только $0{,}2\,L_э$. Эмпирически найденный коэффициент 0,2 характеризует ухудшение остроты зрения, объясняемое тем, что за очень короткое время τ глазу трудно «разобраться» в наблюдаемой картине.

Иначе обстоит дело, когда наблюдатель непрерывно видит фон яркостью L, а объект с контрастом K появляется на короткое время τ. Теперь $L_э = L$, т. е. L в формуле (140) остается неизменным, а вместо контраста K нужно поставить эффективный контраст $K_э$, вычисленный по формуле (82) или, если $\tau \ll \vartheta$, по формуле (76).

76. Видимость точечного источника

При переходе к точечным источникам света пороговые условия упрощаются, так как число входных данных уменьшается: вместо углового размера объекта δ и его контраста с фоном K появляется одна характеристика — блеск источника E. Таким образом, даже для проблесковых огней, когда необходимо учитывать длительность проблеска τ, пороговые условия опреде-

ляются только тремя величинами: блеском огня E, его длительностью τ и яркостью фона L. В гл. 9 было показано, что связь между E и τ на пороге видимости определяется формулой Блонделя и Рея, а входящие в формулу параметры ϑ и E_∞ по нашим экспериментальным данным приведены в табл. 5. Однако лучше получить эти параметры по аналитическим формулам. Для времени инерции ϑ уже была приведена формула (99). Зависимость порогового блеска от яркости фона выведена в работе Травниковой [28]. Для фовеального зрения от самых малых яркостей до яркости $L = 10^{-3}$ кд/м^2 пороговый блеск постоянен и равен $2 \cdot 10^{-8}$ лк. При $L \geqslant 10^{-3}$ кд/м^2 действует формула

$$E_\infty = 1{,}6 \cdot 10^{-7} L^\gamma, \tag{143}$$

где

$$\gamma = \begin{cases} 0{,}6 + 0{,}1 \lg L & \text{при } L \leqslant 30 \text{ кд/м}^2; \\ 0{,}75 & \text{при } L \geqslant 30 \text{ кд/м}^2. \end{cases} \tag{144}$$

Заметим, что при яркости фона $3 \cdot 10^{-3}$ кд/м^2 вся сетчатка одинаково чувствительна к блеску точечного источника [40]. При меньших яркостях чувствительнее периферия, при больших — фовеа.

77. Зрительный поиск

Во всех экспериментах по определению пороговых условий наблюдатель знал заранее, где находится или может появиться тест-объект. Но на практике так бывает довольно редко. Зона, в которой может находиться интересующий наблюдателя предмет, как правило, достаточно велика. Обнаружение его, таким образом, связано с поиском. А при поиске вероятность обнаружить объект растет с увеличением времени поиска t. Здесь мы снова вводим фактор времени t, но смысл его уже не тот, что в § 75. Теперь объект находится в поле зрения непрерывно в течение долгого (теоретически бесконечно долгого) времени, а t — длительность времени, затраченного на поиск. Поиск есть процесс вероятностный, и теория дает для вероятности найти объект за время t формулу [46]

$$W = 1 - e^{-t/t_{ср}}, \tag{145}$$

где $t_{ср}$ — среднее время, которое нужно затратить, чтобы найти объект в данных условиях. А условия эти для поиска одиночного объекта на однородном фоне определяются в основном четырьмя параметрами: размером объекта δ, его контрастом с фоном K, яркостью фона L и угловым размером поля зрения 2β. Мы предполагаем, что поле поиска имеет форму круга и 2β — угловой диаметр этого круга. Объект виден в форме квадрата и δ — угловой размер его стороны.

Две величины характеризуют процесс поиска: время поиска t и вероятность обнаружить объект за это время W. Таким образом, формула, определяющая закономерность поиска, должна связать шесть величин: L, K, δ, 2β, t и W. Проведя обширные экспериментальные исследования, Травникова [46] для поиска на однородном поле одинаковой во всех точках яркости подтвердила правильность формулы (145) и нашла, что

$$t_{ср} = \frac{(2\beta)^2 L^{\gamma}}{a_b K^2 \delta^3 L^{0,3}}. \qquad (146)$$

Коэффициент a_b характеризует поисковую способность наблюдателя при бинокулярном зрении: чем больше a_b, тем меньше (при прочих равных условиях) среднее время, затрачиваемое на отыскание объекта. Среднее значение этого коэффициента для бинокулярного наблюдения получено таким: $a_b = 16(\ldots^\circ)^2(\ldots')^{-3}(\text{кд/м}^2)^{-0,3}\cdot\text{с}^{-1}$. Усложнение размерности обусловлено тем, что 2β принято измерять в градусах, а δ — в минутах.

Введя в формулу (145) значение $t_{ср}$ по формуле (146), мы получим формулу, связывающую все шесть параметров поиска, позволяющую найти любой из них, когда указаны остальные пять. Аналогичную формулу Травникова получила и для поиска точечного источника [47]. При $L \geqslant 10^{-3}$ кд/м^2

$$t_{ср} = \frac{(2\beta)^2 L^{2\gamma}}{a_b E^2}. \qquad (147)$$

Значения γ следует брать по формулам (144). Подставив значение $t_{ср}$ в формулу (146), мы снова получаем связь между всеми параметрами поиска, но уже не между шестью, а только между пятью величинами, потому что, как уже было сказано, вместо контраста и углового размера точечный источник характеризует теперь лишь одна величина — блеск E. Среднее значение коэффициента a_b при бинокулярном наблюдении оказалось равным $2{,}6\cdot 10^{14}(\ldots^\circ)^2(\text{кд/м}^2)^{2\gamma}\,\text{лк}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

Если поле зрения имеет не круглую, а какую-нибудь другую форму, за 2β можно принимать угловой диаметр равновеликого круга, что подтверждено экспериментально.

Формулы, определяющие закономерности поиска, можно рассматривать как обобщение пороговых условий, распространение их на случай, когда положение объекта заранее неизвестно. Поскольку вне лаборатории чаще всего именно так и бывает, практическое значение этих формул весьма велико. Пороговые условия определяют поверхность уже не в трехмерном, а в шестимерном (или пятимерном — для точечного источника) пространстве.

ГЛАЗ КАК ПРИЕМНИК ИНФОРМАЦИИ

78. Пропускная способность зрения

В свете, излучаемом различными источниками или отражаемом предметами, содержится ценнейшая информация об обстановке, в которой мы находимся. Но использовать эту информацию можно только с помощью того или иного зрительного устройства, в частности (и это очень важная частность) с помощью глаза.

Здесь, не пытаясь исследовать практическую ценность получаемой глазом информации (что завело бы нас в малоисследованную область семантики), мы хотим рассмотреть чисто количественные вопросы, определить информационную пропускную способность зрения. Прежде всего следует различать две величины: $C_с$ — пропускную способность совокупности, состоящей из оптической системы глаза, сетчатки и отходящих от нее нервных волокон, и $C_г$ — пропускную способность всего органа зрения в целом, включая высшие нервные центры, воспринимающие и осмысляющие зрительную информацию. Условно $C_с$ мы будем называть пропускной способностью сетчатки.

Оценить, хотя бы грубо, $C_с$ позволяет анатомия глаза. Зрительный нерв состоит приблизительно из миллиона нервных волокон, каждое из которых способно передавать 20 сигналов в секунду, если считать, что время инерции зрения $\vartheta = 0{,}05$ с. Следовательно, $C_с \approx 2 \cdot 10^7$ бит/с.

Более точно величину $C_с$ определила Н. С. Федорова [29, 31] на основе анализа изображения на сетчатке. Пусть изображение, даваемое некоторым прибором, состоит из N элементов, в каждом из которых можно различить m градаций яркости. Количество информации H в таком изображении можно рассчитать по формуле *

$$H = \log_2 m^N = N \log_2 m. \tag{148}$$

Если прибор может передавать изображение с частотой $1/\vartheta$, его пропускная способность

$$C_с = \frac{H}{\vartheta} = \frac{N \log_2 m}{\vartheta}. \tag{149}$$

Количество информации зависит не только от прибора, но и от наблюдаемого объекта. Так, например, если в поле зрения прибора будет только чистое безоблачное небо, количество информации, передаваемой любым прибором, будет близко к нулю.

* Здесь и всюду дальше под H мы подразумеваем полную информацию, равную энтропии системы, что и побудило нас воспользоваться символом H, которым обычно обозначают энтропию [50]. Эту величину H можно назвать информационной емкостью системы.

Поэтому, определяя пропускную способность, следует найти не фактически передаваемое за секунду количество информации, а то количество информации, которое мог бы передавать прибор при наиболее благоприятном выборе объекта передачи. Обычно оказывается возможным увеличить число m градаций яркости путем увеличения площади каждого элемента и соответственно уменьшения их числа N. Зависимость N от m для разных приборов различна. Однако удалось показать, что существует тенденция к увеличению H при уменьшении m, так что H оказывается близким к максимуму при $m = 2$ (одни элементы изображаемой картины белые, другие черные). Но при $m = 2$ $\log_2 m = 1$, т. е.

$$H = N. \tag{150}$$

Чтобы найти H для глаза, необходимо знать $\delta(u)$ — предельный угол разрешения как функцию u, где u — угол между зрительной осью и направлением на объект. Если упрощенно считать, что свойства сетчатки одинаковы по всем меридианам,

$$H = 2\pi \int_0^{\beta} \frac{u\,du}{\delta^2(u)}. \tag{151}$$

Экспериментальные данные работы Пинегина и Травниковой [39] позволяют аппроксимировать функцию $\delta(u)$ выражениями

$$\left.\begin{aligned} \delta &= 0{,}056u + 0{,}82 \text{ при } 0 \leqslant u \leqslant 5°; \\ \delta &= 0{,}108u + 0{,}56 \text{ при } 5 \leqslant u \leqslant 35°, \end{aligned}\right\} \tag{152}$$

где угол δ дан в минутах, а u — в градусах. При подстановке $\delta(u)$ в формулу (151) u и δ можно взять в любых одинаковых единицах. Подставив (152) в (151), после интегрирования в пределах от 0 до 35°, т. е. в пределах поля зрения 70° *, получаем $H = 2{,}2 \cdot 10^6$ бит и $C_c = 2{,}2 \cdot 10^6/0{,}05 = 4{,}4 \cdot 10^7$ бит/с, что по порядку величины совпадает с оценкой, сделанной на основе анатомических соображений.

Для сравнения заметим, что на экране телевизора может быть создана картина с количеством информации в полмиллиона бит, что в несколько раз меньше, чем H глаза.

79. Количество информации

Для рассмотрения многих вопросов, связаных с глазом и другими устройствами, воспроизводящими изображения, бывает достаточно, а иногда и более рационально ограничиться определением количества информации H, не переходя к про-

* Поле зрения глаза, конечно, больше, чем 70°. Но основная цель вычислений заключается в том, чтобы сравнить H невооруженного глаза с H системы глаз плюс телескопический прибор. А окуляры телескопических приборов обычно имеют поле зрения 70°.

пускиой способности. Нужно только еще раз напомнить, что H — не просто количество информации в некоторой конкретной картине, а максимальное количество, которое может содержаться в картине, воспроизводимой данным устройством.

Исходя из количества информации H, можно вывести две важные характеристики зрительного прибора: плотность информации g и коэффициент качества k. Плотностью информации называется отношение количества информации к площади σ входного зрачка прибора:

$$g = H/\sigma. \tag{153}$$

Коэффициентом качества k называется отношение H к H_0, где H_0 — количество информации, которое использовал бы идеальный прибор с тем же диаметром входного зрачка D и тем же полем зрения 2β. А идеальный прибор — это прибор, у которого разрешающая способность по всему полю зрения одинакова и равна дифракционной. Итак,

$$k = H/H_0. \tag{154}$$

Дифракционная формула (2) для предельиого угла, если считать, что $\lambda = 5{,}55 \cdot 10^{-5}$ см, а δ выражать в минутах, дает

$$\delta = \frac{0{,}233}{D}, \tag{155}$$

где D — диаметр входного зрачка прибора, см; δ — предельный угол, ...′. Подставив значение δ в формулу (151), после интегрирования, получим

$$H_0 = 58\, D^2\beta^2 \tag{156}$$

(здесь угол β выражеи в минутах) или

$$H_0 = 2{,}09 \cdot 10^5 D^2\beta^2 \tag{157}$$

(здесь β — в градусах).

Подставив в формулу (157) вместо D диаметр зрачка глаза $d_г = 0{,}37$ см и $\beta = 35°$, получим $H_0 = 3{,}5 \cdot 10^7$ бит. Вспомнив, что для глаза $H = 2{,}2 \cdot 10^6$ бит, найдем по формуле (153) плотность информации $g = 2{,}06 \cdot 10^7$ бит/см^2 и по формуле (154) коэффициент качества $k = 0{,}063$.

Что можно сказать о полученных значениях k и g? По коэффициенту качества глаз находится примерно на среднем уровне, если сравнивать его с современными биноклями. По плотности информации на входном зрачке глаз оказывается несомненным чемпионом, превосходя различные бинокли в десятки и даже в сотни раз *.

* Более подробные сведения о биноклях будут приведены в гл. 17.

Поскольку материальным носителем зрительной информации служит свет, с увеличением освещенности возрастает поток информации, поступающей в глаз, т. е. повышается пропускная способность глаза C_c.

Яркость окружающих предметов пропорциональна освещенности, а с ростом яркости в формуле (149) возрастает числитель и уменьшается знаменатель, т. е. C_c увеличивается. Числитель возрастает в силу уменьшения δ [см. формулу (132)], а время инерции ϑ уменьшается с ростом яркости [см. формулу (99)]. Можно рассчитать, например, что при яркости фона 14 кд/м^2 $C_c = 2{,}6 \cdot 10^7$ бит/с, а при яркости 100 кд/м^2 $C_c = 4{,}4 \cdot 10^7$ бит/с.

Пропускную способность C_c можно непосредственно связать со световым потоком, проникающим в глаз и передающим информацию [32]. Введем величину z'_c — удельный поток информации, т. е. количество информации, приносимое в секунду одним люменом света. Если пропускная способность C_c обеспечивается световым потоком Φ', то

$$z_c = C_c/\Phi'. \qquad (158)$$

Конечно удельный поток информации — величина переменная, зависящая прежде всего от яркости фона L. Ориентировочным расчетом было получено, что при $L = 14$ кд/м^2 $z'_c = 1{,}7 \times 10^{11}$ бит/(лм · с). При понижении яркости z'_c возрастает, причем при переходе к малым яркостям — очень значительно. Это объясняется тем, что с ухудшением внешних условий наблюдения вступают в силу компенсирующие факторы внутри зрительной системы, действие которых выражается, в частности, в повышении степени использования тех слабых потоков, которые проникают в глаз.

Но и при $L = 14$ кд/м^2 мы получили для z'_c чрезвычайно большое число. Однако такое огромное количество информации несет только поток Φ', непосредственно входящий в глаз. Если же мы перейдем к потоку Φ, освещающему наблюдаемую картину, то получим для удельного потока информации (обозначим его теперь z_c) значительно меньшее число.

Пусть наблюдаемая картина имеет форму диска диаметром 42 см со средним коэффициентом отражения $\rho = 0{,}7$. Если поместить глаз на расстояние 30 см от диска, диск будет виден под углом 70°: для такого поля зрения проведены все наши расчеты по формулам (151) и (152), см. сноску к стр. 108. Диск получит среднюю яркость 14 кд/м^2, если на него направить поток $\Phi = 8{,}8$ лм. Пропускную способность зрения C_c при $L = 14$ кд/м^2 мы уже вычислили. Разделив C_c на Φ, получим $z_c = 3 \cdot 10^6$ бит/(лм·с).

81. Пропускная способность зрения в целом

Какая же часть подготовляемой на сетчатке и направляемой в мозг информации C_c активно им используется? Иначе говоря, чему равна пропускная способность зрения в целом $C_г$? В. Д. Глезер и И. И. Цуккерман [13] приводят данные, из которых видно, что по самым щедрым подсчетам $C_г = 72$ бит/с.

Зингер [58], ссылаясь на Шеннона и Винера, пишет, что человек может читать 5—6 слов в секунду. Считая, что в английском слове в среднем 4,2 буквы и умножая на 6, получим 25 букв в секунду. При учете взаимосвязи между буквами в английском языке на каждую букву приходится среднее количество информации 2,35 бит. Умножая на 25, получим $C_г \approx$ $\approx$ 60 бит/с, т. е. примерно то же число.

А между тем C_c исчисляется десятками миллионов бит *. Периферическая часть органа зрения непрерывно запасает огромное количество информации, из которого только ничтожная часть активно используется сознанием. Но, видимо, эта ничтожная по количеству часть особенно нужна в каждый данный момент для решения жизненно важных задач, т. е. практическое ее значение отнюдь не ничтожно. А запас информации на периферии дает свободу выбора того, что нужно использовать.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

СВЕТ И ЦВЕТ

82. Качество света

До сих пор мы говорили о способности глаза воспринимать световые воздействия, каждое из которых определяется одной скалярной величиной, прежде всего яркостью. Шкала яркостей располагается вдоль одной линии, яркостный контраст тоже одномерен. Однако в природе постоянно встречаются предметы одинаковой яркости, а тем не менее глаз хорошо отличает их друг от друга. Они отличаются по качеству отраженного от них света, по его спектральному составу, например зеленый лист и красная роза. Таким образом, кроме количественных характеристик света глаз воспринимает и различает его качественные характеристики. Объясняется это тем, что аппарат дневного зрения (колбочковый) имеет три приемника света с различной селективной чувствительностью. Условно их называют красным, зеленым и синим. Благодаря наличию этих селективных приемников глаз способен ощущать не только яркость, но и цветность предмета. Цветность в свою очередь тоже сложное понятие.

* Подробный анализ этого несоответствия дают Глезер и Цуккерман [13].

Красная роза может быть насыщенно красной, а может быть и розовой, т. е. бледно-красной. Слово «красный» приближенно определяет то, что в науке о цветовых измерениях — колориметрии — называют цветовым тоном излучения, а уточнение «бледно» характеризует малую насыщенность или, если применить колориметрический термин, малую чистоту цвета. Итак, цвет можно определить тремя величинами: яркостью L, цветовым тоном λ, чистотой цвета p. Монохроматическое излучение любой области спектра обладает чистотой p, равной единице. Примесь белого понижает p, и для белого цвета $p = 0$. Но пока нам важно одно: цвет полностью может быть определен тремя числами.

Вскоре мы увидим, что для определения цвета можно избрать и другие величины, но их должно быть обязательно три, что соответствует трем приемникам излучения в сетчатке. Три величины можно считать координатами в трехмерном пространстве и любой цвет — точкой в нем. Совокупность всех возможных — реальных — цветов заполнит некоторый объем, образуя так называемое цветовое тело.

83. Система *RGB*

Основные величины, характеризующие цвет, можно выбрать такими, что цвет получит свойства вектора, а это значительно упростит колориметрические расчеты. Чтобы с цветом можно было обращаться, как с вектором, за три координаты следует принять три цвета и считать их основными в рассматриваемой системе. Познакомимся прежде всего с системой *RGB*, в основу которой положены три цвета, соответствующие монохроматическим излучениям с длинами волн 700; 546,1 и 435,8 нм. Любой другой цвет представлен как вектор в пространстве с составляющими r', g' и b' по осям координатной системы R, G и B соответственно, т. е.

$$\text{Ц} = r'\mathbf{R} + g'\mathbf{G} + b'\mathbf{B}, \qquad (159)$$

где Ц — вектор цвета; **R**, **G**, **B** — единичные векторы основных цветов.

Экспериментально найти эти координаты любого цвета Ц или, иначе говоря, измерить цвет Ц можно с помощью колориметра. Колориметр — усложненный фотометр, на одно из полей которого подается излучение измеряемого цвета Ц, а на другое — смесь основных излучений R, G и B*. Меняя интенсивности основных излучений смеси, добиваются визуального равенства обоих полей по яркости и цветности, т. е. по цвету. Получают координаты измеряемого цвета, т. е. составляющие

* В практически применяемых колориметрах, например в колориметре Демкиной, смешиваются не спектрально чистые излучения, а другие, цвет которых тщательно промерен. Переход к координатам R, G, B или другим осуществляется расчетным путем.

вектора, длина которого характеризует яркость, а направление в пространстве — цветность.

Отложим на осях R, G и B единичные векторы **R**, **G** и **B** и проведем плоскость через концы этих трех векторов. Мы получим треугольник (рис. 39), на вершинах которого лежат точки R, G, B. Координаты любого единичного вектора получим по формулам

$$r = \frac{r'}{r' + g' + b'}; \quad g = \frac{g'}{r' + g' + b'}; \quad b = \frac{b'}{r' + g' + b'}, \tag{160}$$

из которых ясно, что

$$r + g + b = 1 \tag{161}$$

и что, следовательно, цветность — величина двухмерная, ибо определяется только двумя независимыми переменными. Цветность — точка на плоскости, изображенной на рис. 39.

Стороной треугольника RB и опирающейся на нее кривой очерчена область реально существующих цветностей. Лежащая в центре треугольника точка W есть цветность белого равноэнергетического излучения (источник E). Яркости единичных цветов, казалось бы, проще всего положить равными друг другу и равными, скажем, 1 кд/м². Однако оказалось, что при смешении трех цветов с одинаковыми яркостями получается отнюдь не белый, а голубой цвет. Чтобы получить белый цвет E, приходится брать красного больше, чем синего, а зеленого еще больше, чем красного. Это неравенство можно перенести на единицы цветов и считать яркости единичных цветов такими [35]: $L(R) = 683$ кд/м²; $L(G) = 3135$ кд/м²; $L(B) = 41$ кд/м². Деля яркости единичных цветов на 683 кд/м² (коэффициент, введенный для упрощения некоторых расчетов), получаем для каждого из основных цветов его яркостный коэффициент: $L_R = 1$; $L_G = 4{,}59$; $L_B = 0{,}06$.

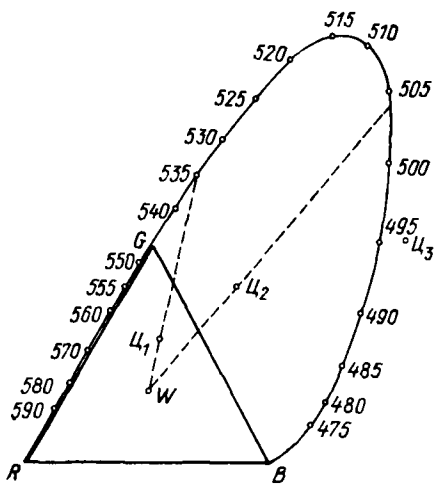


Рис. 39. Плоскость единичных цветов

Яркость цвета **Ц** с координатами r', g' и b' можно рассчитать по формуле

$$L(\text{Ц}) = 683\,(r'L_R + g'L_G + b'L_B). \tag{162}$$

Яркость L любого цвета **Ц** равна сумме яркостей составляющих его цветов, а длина вектора **Ц** равна сумме его координат. Это положение как будто противоречит основам векторного

исчисления: длина вектора не равна сумме его составляющих. Но здесь все дело в переменном масштабе измерения: длина единичного вектора зависит от его направления.

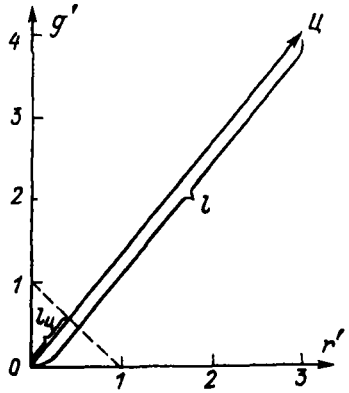


Рис. 40. Пример сложения векторов цвета

Операции с такими векторами не так уж сложны, но все же несколько тяжеловесны. Однако, чтобы понять суть дела, достаточно рассмотреть хотя бы один конкретный пример. Предположим, у нас есть цвет **Ц** с координатами (рис. 40) $r' = 3$, $g' = 4$, $b' = 0$. Вектор **Ц** в данном случае лежит в плоскости R, G.

Если бы 3 и 4 были просто единицами длины, l равнялось бы 5. Но проведем между точками $r' = 1$ и $g' = 1$ прямую (след плоскости единичных векторов) и получим длину отрезка $l_Ц$ — длину единичного вектора цвета **Ц**. Легко убедиться простым отсчетом, что $l = 7l_Ц$. Перенос задачи из плоскости в пространство ($b' \neq 0$) по существу ничего не меняет.

84. Цветность

Двухмерная диаграмма цветности наглядно изображается плоскостью единичных векторов (рис. 39). Чтобы получить на этой диаграмме цветность любого цвета **Ц**, достаточно предположить, что в точках R, G и B подвешены грузы, пропорциональные координатам цвета r', g' и b', а затем найти центр тяжести системы. Поставленная на диаграмме точка центра тяжести изображает цветность цвета **Ц**.

Пусть нам дан цвет $\mathbf{Ц}_1$ с координатами $r' = 0{,}27$; $g' = 0{,}90$; $b' = 0{,}40$. На плоскости рисунка 39 он изображается точкой $Ц_1$. Проведем через точки W и $Ц_1$ прямую и продолжим ее до линии спектральных цветов. Мы попадаем в точку $\lambda = 535$ нм. Значит, цвет $\mathbf{Ц}_1$ зеленый. Но точка $Ц_1$ лежит близко к точке W. Следовательно, чистота цвета $\mathbf{Ц}_1$ мала. Он похож на белый и только слегка зеленоват.

Теперь рассмотрим цвет $\mathbf{Ц}_2$ с координатами $r' = -0{,}22$; $g' = 0{,}90$; $b' = 0{,}50$. Его цветовой тон $\lambda = 504$ нм (тоже зеленый, но другого оттенка). Но что означает отрицательная координата? Дело в том, что смешением трех основных цветов системы RGB можно получить только цвета, лежащие внутри треугольника RGB. Смешением можно получить цвет любого цветового тона, но чистота цвета при смешении уменьшается. Это уменьшение почти незаметно в длинноволновой области спектра (сторона треугольника RG) и очень сильно для зеленых и синих цветов.

А что физически означает отрицательная координата? Если на одно поле колориметра подан цвет $Ц_2$, на другое нужно подать составляющие g' и b'. А составляющую r' в количестве 0,22 нужно подать на поле измеряемого цвета.

Рис. 39 позволяет легко находить для любого цвета дополнительный цвет, т. е. получать пару цветов, которые при смешении (в строго определенной пропорции) дают белый цвет W. Так, например, к голубому цвету с $\lambda = 490$ нм дополнительным будет оранжевый ($\lambda = 600$ нм).

Но многие цвета не имеют спектрально-чистых дополнительных: так, напрнмер, прямая, проведенная от $\lambda = 535$ нм через W, упирается в сторону RB. Тут лежат пурпурные цвета, которых нет в спектре. Их обычно характеризуют длнной волны дополнительного к ним цвета.

85. Система *XYZ*

Отрицательные координаты многих цветов в системе RGB вызывают некоторые неудобства при колориметрических расчетах. Однако простым изменением выбора основных цветов этого недостатка устранить нельзя. В системе RGB взяты за основу спектрально чистые цвета, а смешение снижает их чистоту. Следовало бы взять за основу цвета с чистотой, большей, чем у спектральных цветов, но таких в природе не существует. Взглянем, например, на точку $Ц_3$ на рис. 39. Она изображает некий цвет, который имеет определенные составляющне в системе RGB. Координаты его $r' = -0{,}35$; $g' = 0{,}34$; $b' = 0{,}34$. Но таких цветов в природе нет. Они лежат вне области реальных цветов. Это цвета нереальные.

Однако нереальные цвета имеют чистоту, большую, чем у спектральных (или у чистых пурпурных — линия RB), и ими можно воспользоваться для формальных математических преобразований. Выбрав за основные три нереальные цвета, можно построить систему, в которой все реальные цвета будут иметь только положительные координаты. Такая система построена. Это международная система XYZ. Все три основные ее цвета X, Y и Z — цвета нереальные. Зато любой реальный цвет в системе XYZ имеет только положительные координаты. Остававшаяся большая свобода выбора основных цветов позволила наложить на них еще некоторые условия. Как и в системе RGB, при равенстве координат $x' = y' = z'$ получается белый равноэнергетический цвет. Кроме того, вся яркость цвета сосредоточена в одной координате Y. Яркостные коэффициенты системы: $L_x = 0$; $L_z = 0$; $L_y = 1$.

86. Колориметрические расчеты

Цвет любого излучения — непосредственно идущего от источника, или прошедшего сквозь фильтр, или рассеянного поверхностью предмета — можно не только измерить колориметром, но и вычислить, если известен спектральный состав излучения.

В 1931 г. на VIII сессии МКО была принята система RGB и утверждены кривые сложения (см. рис. 41), которые лежат в основе пересчета спектрального состава в цвет по формулам

$$\left.\begin{aligned} r' &= \int P_\lambda \bar{r}(\lambda)\, d\lambda; \\ g' &= \int P_\lambda \bar{g}(\lambda)\, d\lambda; \\ b' &= \int P_\lambda \bar{b}(\lambda)\, d\lambda, \end{aligned}\right\} \qquad (163)$$

где P_λ — спектральная плотность мощности излучения, а $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ и $\bar{b}(\lambda)$ — удельные координаты спектральных излучений, показанные на рис. 41.

С официальным принятием такого метода пересчета спектрального состава цвет стал уже объективной физической величиной, независимой от индивидуальных свойств глаза.

От чего же зависит цвет окружающих нас предметов? От спектрального распределения коэффициентов отражения $\rho(\lambda)$ и от спектрального состава падающего света P'_λ. При вычислении цвета поверхности предмета в формулах (163) следует сделать подстановку $P_\lambda = P'_\lambda \rho(\lambda)$.

В специальных книгах по колориметрии [17] развит довольно сложный математический аппарат для всевозможных колориметрических расчетов. Мы хотели здесь показать только основные их принципы, сделав их по возможности наглядными.

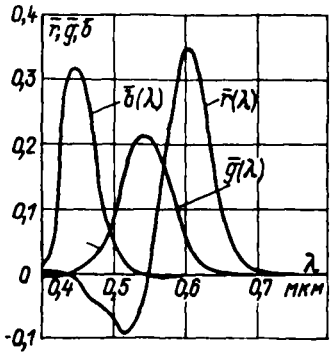


Рис. 41. Кривые сложения системы *RGB*

87. Цветовые пороги

Часто считают цвет тела некоторой постоянной, присущей ему характеристикой: лист зеленый, апельсин оранжевый и т. д. Это неверно. Цвет тела зависит от спектрального состава освещающего его света. Но хотелось бы, чтобы он не зависел от интенсивности освещения. Этого можно достигнуть, если одной из координат цвета тела сделать не яркость, а коэффициент отражения поверхности тела * ρ. В системе *XYZ* яркость полностью характеризуется координатой y'. Все три координаты цвета можно нормировать, исходя из условия $y' = \rho$. Приняв во внимание, что коэффициент отражения не может превышать ста процентов, получим условие $y' \leqslant 100$. Соответственно конечные значения приобретают и другие координаты x' и z', и все цветовое тело в такой системе получает конечный объем.

Хотя число точек — различных цветов — и в такой системе остается бесконечным, но конечным можно считать число различаемых цветов. Если разница в цветовых координатах двух соседних цветов меньше некоторой пороговой величины, мы не можем отличать один цвет от другого.

Возьмем два близких, едва различимых цвета $\mathbf{Ц}_0$ и $\mathbf{Ц}_1$. Пороговая разность этих векторов $\Delta\mathbf{Ц}_1$ тоже вектор. Кроме цвета $\mathbf{Ц}_1$ имеется еще множество цветов $\mathbf{Ц}_i$, которые едва отличимы от цвета $\mathbf{Ц}_0$. Вокруг $\mathbf{Ц}_0$ образуется геометрическое место концов всех векторов $\Delta\mathbf{Ц}_i$ — поверхность, ограничивающая объем цветов, не отличимых от $\mathbf{Ц}_0$. Дело обстояло бы не так уж сложно,

* Предполагается, что поверхность подчиняется закону Ламберта, т. е. яркость ее во всех направлениях одинакова.

если бы все векторы $\Delta Ц_i$ были равны по модулю, т. е. пороговая поверхность была бы сферой. Но ни в одной из упомянутых нами систем это условие не соблюдается. Можно, хотя и приближенно, считать пороговую поверхность трехосным эллипсоидом с полуосями $\Delta x'$, $\Delta y'$, $\Delta z'$.

Сделано несколько попыток так преобразовать колориметрическую систему, чтобы во всех областях цветового тела равным расстояниям между двумя точками соответствовало равное число пороговых различий цвета. На этом принципе создано несколько систем [35], называемых равноконтрастными. Однако все они выполняют предъявляемое к ним требование весьма приближенно.

Сколько же цветов может различать глаз во всем объеме цветового тела? Сколько-нибудь точного ответа на этот вопрос мы дать не можем. Ограничимся грубой оценкой. Сделаем ее в наиболее наглядной системе: ρ — коэффициент отражения; λ — цветовой тон; p — чистота цвета. В работе [33] число градаций яркости приближенно определяется по формуле

$$m = 2 + \frac{\lg K}{\lg (1 - K)}, \qquad (164)$$

где K — пороговый (по яркости) контраст. Положив $K = 0{,}03$ *, получим $m = 120$. Пороговые различия по цветовому тону в разных местах спектра различны. Минимальное значение $\Delta\lambda = 1$ нм. Но так как для многих участков спектра и пурпурных тонов $\Delta\lambda$ значительно больше, можно принять, что всего глаз способен различать 150 цветовых тонов [35].

Число градаций чистоты цвета в среднем можно считать равным 15. Перемножив эти три числа, получим для всего количества различаемых цветов внушительную величину — 270 000. Это число, видимо, сильно преувеличено, так как на самом деле цветовые пороги по одной координате зависят от других координат. Но реально созданные атласы цветов, в которых различия между соседними цветами значительно больше пороговых, показывают, что различимых глазом цветов очень много: в атласе Менселла 1200 цветов, в атласе Научно-исследовательского института имени Д. И. Менделеева 2000.

Таким образом, цветовое зрение во много раз увеличивает получаемую нами информацию: вместо сотни ступеней яркостных различий нами воспринимаются тысячи различий в цвете предметов.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ

ЗРИТЕЛЬНЫЙ КОМФОРТ

88. Основные характеристики освещения

Хорошее освещение должно удовлетворять многим требованиям, которые можно разделить на количественные и качественные. Количественные определяются уровнем необходимой освещенности, качественные — спектральным составом света и распределением его в пространстве.

Освещение, создаваемое природными источниками света, называется естественным. Внутри зданий естественное освещение осуществляется с помощью боковых окон или верхних фонарей (или теми и другими одновременно). Спектральный состав

* При яркости фона 200 кд/м^2 и размере объекта 10′ по формуле (110) $K = 0{,}03$.

естественного освещения внутри здания отличается от спектрального состава света вне здания ввиду селективности пропускания стекол и отражения различных поверхностей (в основном стен). Однако это отличие в видимой области обычно невелико. Для количественной оценки естественного освещения служит коэффициент естественной освещенности, вычисляемый по формуле (в процентах)

$$K_{е.о} = \frac{E_в}{E_н} \cdot 100, \qquad (165)$$

где $E_в$ — освещенность в какой-либо точке заданной плоскости внутри помещения; $E_н$ — одновременно измеренная наружная горизонтальная освещенность под открытым полностью небосводом. Участие прямого солнечного света в создании той или другой освещенности исключается.

В СССР в зависимости от назначения помещения установлены нормы естественного освещения $K_{е.о}$ от 0,1 до 10%.

С физиологической точки зрения естественное освещение наиболее благоприятно для человека [15], но еще с доисторических времен ему приходилось прибегать к искусственному свету. А стремление к оптимизации искусственного освещения приводит к необходимости решать множество сложных задач.

89. Неравномерность освещения

При лабораторных измерениях зрительных функций обычно стараются создать условия, в которых фон равномерной яркости занимает значительную часть поля зрения (в пределе — все поле зрения) и воздействует на глаз длительное время, так что яркость фона L совпадает с яркостью адаптации. Обычные способы освещения далеки от создания таких условий, а потому и не обеспечивают, как правило, тех значений остроты зрения, контрастной чувствительности и других функций зрения, о которых мы писали в предыдущих главах.

Пинегин показал, что если тестовое поле с яркостью L имеет малый угловой радиус β при совершенно темном окружении, острота зрения зависит от β, уменьшаясь с уменьшением β. Понижает остроту зрения и более яркое окружение. Вредно влияют и отдельные более яркие пятна на периферии поля зрения. Никакое освещение не создает равномерной освещенности всех окружающих предметов или тем более одинакового уровня яркости их. Но регулировка этих неравномерностей — одна из задач рационального освещения.

90. Ослепленность

Основная и почти неизбежная причина появления ярких пятен в поле зрения — это наличие в помещении источников света и светильников. Вообще же яркое пятно, влияющее на функции

зрения, называют блеским источником. Блеский источнпк света ослепляет глаз и вызывает ухудшение зрительных функций, в частности повышение порогового контраста, которое принято объяснять возникновением вуалирующей пелены: яркость ее как бы накладывается на контрастирующий объект и фон.

Обозначим символом K пороговый контраст большого объекта ($\alpha \geqslant 1{,}5°$) на фоне яркостью L при отсутствии блеского источника, а символом $K_в$ — пороговый контраст такого же объекта при наличии блеского источника, создающего вуалнрующую яркость $L_в$. Легко показать, что

$$\frac{K_в}{K} = 1 + \frac{L_в}{L}. \tag{166}$$

Эта формула послужила основанием для введения показателя ослепленности

$$s = 1000 L_в / L. \tag{167}$$

Коэффициент 1000 введен из практических соображений, чтобы не иметь дела с мелкими дробями. Сама величина $L_в$ может быть вычислена по формуле, рекомендованной МКО:

$$L_в = m_в \frac{E}{\theta^2}, \tag{168}$$

где E — освещенность от блеского источника на зрачке наблюдателя, лк; θ — угол между направлением на блеский нсточник и зрительной осью наблюдателя, ...°; $m_в$ — постоянный коэффициент.

Мешков [35] показал, что если яркость $L_б$ блеского источника лежит в пределах от $5 \cdot 10^3$ до 10^6 кд/м^2, то коэффнцнент $m_в$ зависит от $L_б$ и может быть найден по формуле

$$m_в = 3 \lg L_б - 8{,}54. \tag{169}$$

Для $L_б \geqslant 10^6$ кд/м^2 $m_в$ становится величиной постоянной, равной 9,46. Вернер дает близкую величину $m_в = 9{,}2$. Используя для расчетов формулу (168) с коэффициентом $m_в = 10$, мы во всяком случае не преуменьшаем показателя ослепленности s. В случае присутствия в поле зрения нескольких блеских источников одновременно s можно получить, просуммировав действие каждого из источников.

91. Дискомфорт

Наряду с изменением зрительных функций, доступных прямым измерениям, наличие в поле зрения пятен с яркостью, значительно превышающей яркость адаптации, может вызывать неприятные ощущения, называемые днскомфортом. МКО определяет зрительный днскомфорт, как ощущение неудобства или напряжения.

Из количественных методов определения дискомфорта укажем на метод, разработанный в МЭИ под руководством

М. М. Епанешникова [36]. Количественной характеристикой служит тут показатель дискомфорта

$$M_д = \frac{L_б}{\varphi(\theta)} \sqrt{\frac{\omega}{L}}, \qquad (170)$$

где $L_б$ — яркость пятна, вызывающего дискомфорт; ω — размер этого пятна (телесный угол), ср; L — яркость адаптации; $\varphi(\theta)$ — индекс позиции, который можно определить по номограмме (рис. 42). На рисунке l — расстояние от наблюдателя до плоскости, в которой расположено пятно с яркостью $L_б$, a и h — расстояния до центра пятна в этой плоскости, отсчитанные соответственно по горизонтали и по вертикали. На пересечении координат a/l и h/l лежит точка, близкая к кривой, на которой цифрой обозначен индекс позиции. Условиям, при которых половина наблюдателей не отмечает дискомфорта, соответствует значение $M_д = 25$.

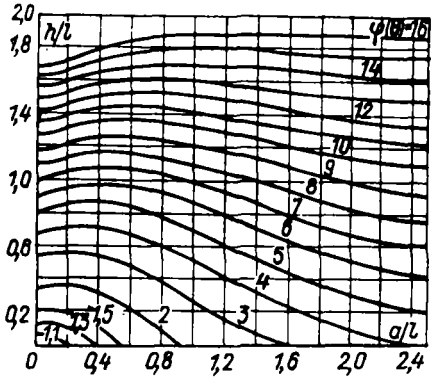


Рис. 42. Номограмма для определения индекса позиции $\varphi(\theta)$

Другая количественная оценка сводится к определению того значения яркости $L_б$, которое лежит на границе комфорт — дискомфорт. Назовем эту яркость $L_{гр}$. По Беннету

$$L_{гр} = \frac{95 L^{0,3} \exp(0{,}05\theta)}{\omega}. \qquad (171)$$

92. Комфортные условия

Максимальные допустимые показатели ослепленности и дискомфорта нормируются в зависимости от назначения помещений. Максимальное значение $M_д = 60$; $s = 60$. Чем меньше оба этих показателя, тем комфортнее условия освещения. Но нужно сказать еще о спектральном его составе.

Цвет предмета, как мы уже знаем, может меняться при изменении освещения. Поэтому в тех случаях, когда важно сохранить неизменность цветовых восприятий, например, в картинных галереях, магазинах, торгующих текстильными изделиями, и т. п., стараются создать освещение, приближенное по спектральному составу к дневному свету. Вообще же различные практически применяемые источники света сильно отличаются друг от друга по спектральному составу. Обычно их характеризуют цветовой температурой $T_ц$, т. е. температурой черного

тела, при которой его излучение имеет ту же цветность, что и рассматриваемое излучение.

Чем ниже цветовая температура тела, тем краснее излучаемый им свет. Однако человек обладает поразительной способностью сохранять постоянство цветового ощущения при освещении различной цветности. Особенно это проявляется в отношении белого цвета: снег, мел или бумага кажутся нам белыми и при свете свечи, и в лучах лампы накаливания, и при дневном свете. Между тем спектральный состав попадающего в глаз света в этих случаях меняется в весьма широких пределах. И если провести специальный эксперимент, осветив одну половину листа бумаги, скажем, лампой накаливания, а другую — дневным светом, то мы отчетливо увидим первую половину красной, а вторую — голубой.

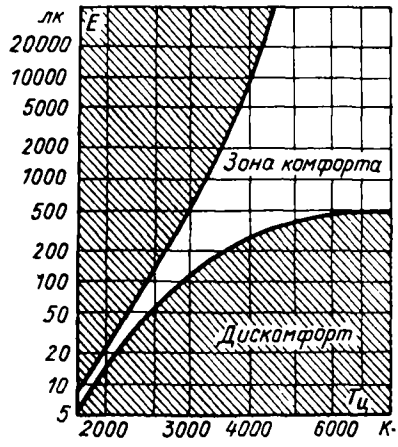


Рис. 43. Диаграмма для определения зоны комфорта

Как уже было сказано, комфортная интенсивность освещения оказывается тесно связанной с цветовой температурой источника [35]. Видимо, это объясняется историческими причинами. Тысячи лет человек применял для искусственного освещения пламенные источники света: костер, факел, свечу, масляную лампу. Освещение было низкотемпературным, освещенность — малой. И в сознании человека оказались прочно связанными эти характеристики освещения: ночью он мирился со слабым, красноватым светом и считал его достаточно ярким. Днем господствовал яркий белый (по сравнению с ночным — голубой) свет. И вот до сих пор, чем выше цветовая температура источника, тем большей яркости требует человек. Сказанное наглядно поясняется рис. 43. Комфортный интервал освещенностей резко возрастает с повышением цветовой температуры источника.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

ОСВЕЩЕНИЕ И РАБОТА

93. Зрительная работа

Получаемая с помощью зрения информация нужна человеку обычно не просто для того, чтобы принять ее к сведению. Она необходима для обоснования практической деятельности

человека, для контроля над процессом производства. Работающий человек редко обходится без помощи глаз, и чем тоньше работа, тем больше нагрузка на зрение. На производстве необходимо создавать условия, как можно более благоприятные для зрительной работы, т. е. прежде всего комфортное и достаточно интенсивное освещение.

Для выбора освещенности в рабочем помещении необходимо учитывать зависимость зрительных функций от яркости адаптации, причем особое внимание следует обратить на функцию, о которой мы до сих пор не говорили: на быстроту различения.

94. Быстрота различения

При зрительной работе приходится замечать и опознавать какие-то детали, ставить их в определенное положение относительно друг друга. Естественно, что производительность труда при этом будет тем выше, чем скорее будут опознаваться детали, иначе говоря, чем больше будет быстрота различения. Быстрота различения есть величина, обратная времени τ, необходимому для обнаружения или опознания объекта. Ее размерность $с^{-1}$.

На основе работ ([35], стр. 67), ([26], стр. 171) Белова [1] получила для $1/\tau$ формулу, которая затем была приведена к более простому виду *

$$\frac{1}{\tau} = \frac{0{,}434}{\vartheta \lg \frac{V_к}{V_к - 1}}, \qquad (172)$$

где $V_к = K/K_п$, т. е. отношение контраста объекта к пороговому контрасту в тех же условиях (при том же угловом размере α и при данной яркости фона L); ϑ — время инерции.

Проведя сравнение с экспериментальными данными, Белова показала, что формула (172) не противоречит им. Особенно хорошее совпадение с экспериментом получается при больших значениях быстроты различения ($\tau < 0{,}02$ с).

Самсонова провела большое экспериментальное исследование [43], показавшее, что, как и следовало ожидать, быстрота различения возрастает с увеличением яркости. Еще раньше аналогичные результаты были получены в других исследованиях. Можно считать [36], что быстрота различения линейно зависит от логарифма яркости:

$$1/\tau = a + b \lg L, \qquad (173)$$

где параметры a и b зависят от контраста объекта с фоном, от

* Формула (172) легко выводится из нашей формулы (82) простым решением ее относительно величины $1/\tau$, если положить, что $K_э = K_п$. Коэффициент 0,434 возник вследствие перехода от натуральных логарифмов к десятичным ($\lg e = 0{,}434$).

угловых размеров объекта и диапазона яркостей *. Так, например, при обнаружении черной точки диаметром $\alpha = 2{,}4'$ для $K = 0{,}95$ в диапазоне яркостей L от 5 кд/м^2 до $3{,}2 \cdot 10^3$ кд/м^2 имеем $a = -7$; $b = 63$.

95. Освещенность и производительность труда

Влияние быстроты различения на производительность труда зависит от степени участия зрения в работе. Но вообще, чем больше быстрота различения, тем скорее идет зрительная работа и тем выше производительность труда.

Однако зрительная работа должна быть не только быстрой, но и точной. Работник должен делать как можно меньше ошибок, иначе говоря, вероятность правильных действий W должна быть как можно ближе к единице. Вестон [36] предложил зрительную работоспособность η определять по формуле

$$\eta = \frac{1}{\tau} W. \tag{174}$$

Для измерения τ испытуемому предлагалось из таблицы, содержащей N колец Ландольта, вычеркнуть кольца, имеющие определенное направление разрыва. Таких колец было m. Если, затратив на всю работу время t, испытуемый правильно вычеркнвал m' колец, можно было считать, что

$$\frac{1}{\tau} = \frac{N}{t} \text{ и } W = \frac{m'}{m}, \text{ т. е. } \eta = \frac{N}{t}\frac{m'}{m}.$$

Величина η зависит не только от яркости фона L, но и от выбранных тест-объектов, в основном от их размера α и контраста с фоном K. Чтобы уменьшить влияние параметров объекта, Вестон ввел еще одну величину — относительную зрительную работоспособность η_0. Она равна отношению η к максимальной работоспособности η_m, которая может быть получена для тест-объекта с параметрами α и K при оптимальной яркости фона: $\eta_0 = \eta/\eta_m$. На основе результатов своих экспериментов Вестон вывел эмпирическую формулу, связывающую η_0 с освещенностью при разных α и K. Для $K = 0{,}25$ и $\eta_0 = 0{,}9$ формула Вестона дает

$$E = \frac{1900}{\rho\alpha^{1.5}}, \tag{175}$$

где E выражено в люксах, α — в минутах, ρ — коэффициент отражения рабочей поверхности. Эта формула положена в основу английского осветительного кодекса 1961 г.

Относительный прирост производительности труда ΔQ_{ij} при переходе от яркости L_i к яркости L_j описывается формулой

$$\Delta Q_{ij} = q_{ij}(\lg L_j - \lg L_i), \tag{176}$$

---

* В [36] формула по Лекишу и Моссу приведена в виде $1/\tau = a + b \lg (L - C)$, причем по данным той же книги почти во всех случаях $C = 0$.

где q_{ij} — критерий отзывчивости по производительности труда, который можно считать величиной постоянной, если отношение $L_j/L_i \leqslant 10$; q_{ij} зависит прежде всего от характера работы, а затем от уровня яркости. При малой исходной яркости L_i коэффициент отзывчивости велик, а с повышением яркости он уменьшается. Естественно, что при совсем малом q_{ij} дальнейшее повышение яркости становится экономически невыгодным, что и принимается во внимание при нормировании освещенности. Коэффициент отзывчивости наглядно показывает, как в производственных процессах труд и свет совместно материализуются в полезную продукцию фабрик и заводов.

Конечно, нормы освещенности [18] базируются не только на экономических соображениях. Учитываются гигиенические соображения, техника безопасности и т. п. Построение системы правил и норм освещения — задача сложная. Для ее решения призывается весь арсенал светотехнической науки, и поэтому здесь не место вдаваться в детали. Читателю, желающему глубже ознакомиться с вопросом, можно рекомендовать обратиться к книге В. В. Мешкова и М. М. Епанешникова [36], на которую мы здесь неоднократно ссылались, а также и работам Ц. И. Кроль (см., например, [23]).

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ

ВООРУЖЕННЫЙ ГЛАЗ

96. Приборы, работающие совместно с глазом

Из огромного разнообразия оптических инструментов нас будут интересовать только приборы, которые работают вместе с глазом, образуя единую систему, вооружая глаз.

Собственно, один из видов таких приборов мы уже рассмотрели — это очки. Но очки только помогают сфокусировать на сетчатке изображение предметов, которые нормальный глаз фокусирует и без помощи прибора. Настоящее вооружение глаз дает возможность увидеть то, что недоступно невооруженному глазу. Действие его в основном сводится к созданию на сетчатке изображения, размеры которого больше, чем они были бы без прибора. Приборы, вооружающие глаз, характеризуются увеличением, обычно бо́льшим единицы.

Если необходимо изучать объекты, очень малые по абсолютному размеру, прибегают к микроскопу. Если объекты очень удалены и потому малы их угловые размеры, помогает телескоп.

97. Микроскоп

Пусть подлежащие изучению детали объекта имеют линейный размер h, настолько малый, что $h/l_0 \ll 3 \cdot 10^{-4}$, где $l_0 = 250$ мм — расстояние наилучшего зрения, а $3 \cdot 10^{-4} \approx 1'$

Чтобы сделать угол α, под которым видна деталь, большим $1'$, следует значительно уменьшить расстояние объекта от глаза; но тогда мы не сможем сфокусировать изображение объекта на сетчатке. Помочь может собирающая линза с малым фокусным расстоянием f. Поместив объект в ее фокус, мы сможем приставить глаз к линзе и получить на сетчатке четкое изображение предмета. Угол α будет теперь уже не h/l_0, а h/f, т. е. увеличится в l_0/f раз. Такая линза, называемая лупой, дает увеличение $\Gamma = l_0/f$.

Если нужно получать большие увеличения, применяют микроскоп — систему, состоящую из объектива и окуляра. Предмет помещают немного дальше передней фокальной плоскости объектива и получают действительное увеличенное изображение его в фокальной плоскости окуляра, который работает как лупа. Если фокусное расстояние объектива f_b, а окуляра f_k, причем расстояние между фокусами внутри трубы $l_т$, микроскоп дает увеличение

$$\Gamma = \frac{l_0 l_т}{f_b f_k}. \tag{177}$$

При малых f_b и f_k и большой длине $l_т$ увеличение Γ можно сделать очень большим, скажем две-три тысячи. Однако мы не можем безгранично уменьшить h — размер видимой в микроскоп детали. Этому препятствует дифракция. Еще различаемая в микроскоп деталь не может быть значительно меньше длины волны используемого света λ. Формула для предельно разрешающего размера такова

$$h = \frac{\lambda}{2n \sin u}, \tag{178}$$

где n — показатель преломления среды, в которую погружены объект и переднее стекло объектива; u — угол между осью объектива и крайним, входящим в него лучом. В современных объективах u доводится почти до 90°, а $n \approx 1{,}5$. Поэтому можно считать, что

$$h \approx \frac{1}{3}\lambda.$$

На расстоянии 25 см глаз разрешает размер $h_0 \approx 0{,}07$ мм (считаем, что предельный угол $\delta \approx 1' \approx 3 \cdot 10^{-4}$). А одну треть длины волны видимого света можно принять за $h = 1{,}8 \cdot 10^{-4}$ мм. Отсюда

$$\Gamma = \frac{h_0}{h} = \frac{7 \cdot 10^{-2}}{1{,}8 \cdot 10^{-4}} \approx 400.$$

Итак, рациональное увеличение для микроскопа, работающего в видимом свете, 400—500. При значительно больших увеличениях наблюдатель не увидит никаких новых деталей объекта, но может увидеть то, чего в объекте нет: дифракционную картину, создаваемую объектом.

Следует заметить, что освещенность изображения на сетчатке падает пропорционально квадрату Г. Поэтому в микроскопе требуется создавать очень большие освещенности объекта и максимально использовать свет, улавливая его в широком апертурном угле u. Чем больше будет уловленный поток, тем в конечном счете бо́льшую информацию получим мы об объекте.

98. Телескоп

Как показывает само название, телескоп предназначен для изучения далеких объектов. Их в подавляющем большинстве случаев мы не можем освещать (использование прожекторов — сравнительно редкий случай). И для того чтобы собрать от далекого объекта достаточно много света, остается один путь: применение большого объектива, большой диаметр входного зрачка D. Большой входной зрачок — это и есть основное достоинство телескопа. Напомним, что разрешающая сила телескопа прямо пропорциональна D [см. формулу (155)]. Существует, однако, ряд причин, ограничивающих величину D. Во-первых, назначение прибора накладывает ограничение на его габариты: вряд ли будет удобен, например, бинокль с полуметровыми объективами. Во-вторых, чем больше объектив, тем труднее обеспечить хорошее качество даваемого им изображения. Наибольшие объективы применяются в астрономических телескопах.

Уловленные большим входиым зрачком световые потоки необходимо рационально использовать, т. е. влить в глаз, имеющий малый зрачок, диаметр которого $d_г$. Сжатие пучка света, входящего в объектив, достигается с помощью увеличения Г. Сохраияя символы, примененные для микроскопа, для телескопа можно написать

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg}\alpha'}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{f_b}{f_k} = \frac{D}{D'} = \frac{\operatorname{tg}\beta'}{\operatorname{tg}\beta}, \qquad (179)$$

где D' — выходной зрачок телескопа; α и α' угловой размер наблюдаемого объекта в пространстве предметов и в пространстве изображений соответственно; β — половина угла поля зрения объектива, а β' — окуляра. Разрешающая сила телескопа пропорциональна D [см. формулу (155)]. Для того чтобы весь свет*, собранный объективом, вливался в глаз, необходимо соблюдение условия $D' \leqslant d_г$. Если $D' = d_г$ увеличение называют равнозрачковым и обозначают $\Gamma_р$. Теоретически $\Gamma_р$ — наилучшее увеличение: весь свет попадает в глаз, и все, что разрешается объективом, разрешается глазом.

При $\Gamma < \Gamma_р$ увеличение недостаточно, чтобы глаз воспринял все детали, разрешаемые объективом. Разрешающая сила си-

* Мы пренебрегаем пока потерями света в приборе, считая, что его светопропускание $\tau_с = 1$.

стемы глаз плюс оптический прибор занижена. Объясняется это тем, что в глаз попадает не весь свет, собранный объективом. Действующий диаметр объектива в этом случае равен диаметру зрачка глаза, умноженному на увеличение ($d_г\Gamma$), т. е. он меньше, чем D.

Если $\Gamma > \Gamma_р$, световой поток на сетчатке распределяется по слишком большой площади, что приводит к уменьшению видимой яркости предметов.

Учтем теперь отличное от единицы пропускание системы $\tau_с$ и подытожим результаты. Яркость объекта назовем L, а яркость, видимую в телескоп, L'. При любом увеличении $\alpha' = \alpha\Gamma$; $\operatorname{tg}\beta = \operatorname{tg}\beta'/\Gamma$.

$$\left.\begin{array}{c} \text{При } \Gamma = \Gamma_р \\ \delta = \frac{1{,}22\lambda}{D};\ L' = \tau_с L; \\ \text{при } \Gamma < \Gamma_р \\ \delta = \frac{1{,}22\lambda}{\Gamma d_г};\ L' = \tau_с L; \\ \text{при } \Gamma > \Gamma_р \\ \delta = \frac{1{,}22\lambda}{D};\ L' = L\tau_с \left(\frac{D'}{d_г}\right)^2, \end{array}\right\} \qquad (180)$$

где δ — предельный угол разрешения системы глаз — телескоп в центре поля зрения.

На практике увеличение редко бывает разнозрачковым, прежде всего в силу того, что диаметр зрачка $d_г$ — величина переменная [см. формулу (22)]. С падением яркости зрачок расширяется и желательно, чтобы выходной зрачок прибора все же не оказывался меньше зрачка глаза. Ведь при наблюдении в сумерках особенно важно избежать добавочных потерь яркости. Большой выходной зрачок имеет и другие преимущества: его легче находить (совмещать с ним глаз). Кроме того, заниженное (по сравнению с $\Gamma_р$) увеличение обеспечивает большее поле зрения объектива [см. формулу (179)]. Некоторое снижение разрешающей способности [см. формулу (180) при $\Gamma < \Gamma_р$] допустимо по следующим соображениям. Современные телескопические приборы исправлены настолько, что обеспечивают теоретическую разрешающую силу, но только в центре поля зрения. При удалении от оси системы разрешающая сила довольно быстро падает. И для большей части поля зрения $\Gamma_р$ оказывается преувеличенным. Поэтому у современных биноклей $\Gamma < \Gamma_р$.

Проведенные до сих пор рассуждения относятся к наблюдению протяженных объектов. Наблюдение точечных источников света связано с некоторыми особенностями. Типичный пример точечного источника — звезда. Угловые размеры звезд настолько малы, что даже при большом увеличении $\alpha < 1'$. При любом

увеличении площадь изображения звезды на сетчатке практически остается одинаковой. Нужно только, чтобы весь свет входил в зрачок глаза, т. е. чтобы соблюдалось условие $\Gamma \geqslant \Gamma_р$. Раз это условие соблюдено, блеск звезды E', наблюдаемый в телескоп, связан с ее блеском E зависимостью

$$E' = E\tau_с \frac{D^2}{d_г^2}. \qquad (181)$$

Хотя E' не зависит от увеличения (если $\Gamma > \Gamma_р$), практически выгодно, однако, делать Γ значительно больше $\Gamma_р$. Дело в том, что при $\Gamma > \Gamma_р$ уменьшается видимая яркость протяженных объектов, т. е. фона, на котором видна звезда, что приводит к понижению порогового блеска и к лучшей видимости звезды.

Как известно, блеск звезды характеризуется звездной величиной m. Переходу от m к $m+1$ соответствует уменьшение блеска в 2,5 раза [19]. Предельная величина $m_п$ звезды, которую в благоприятных условиях видит человек с хорошим зрением, равна 6,5. Для телескопов доступны звезды значительно большей звездной величины. Предельная звездная величина $m_п$, доступная телескопу, называется его проницающей силой. Если считать, что $d_г = 0{,}6$ см, а $\tau_с = 0{,}5$, то проникающая сила телескопа (для визуального наблюдения) может быть найдена по формуле

$$m_п = 6{,}86 + 5 \lg D. \qquad (182)$$

В СССР построен и работает рефлектор с диаметром объектива $D = 600$ см. Его проницающая сила $m_п = 20{,}75$; т. е. на 14 единиц звездной величины больше, чем у глаза.

99. Размен информации

Для удобства сравнения со зрительными трубами мы условно ограничили площадь сетчатки полем зрения $2\beta' = 70°$. На такой площади фокусируется изображение, содержащее информацию, максимальное количество которой назовем H'. Это количество не может увеличиться, как бы мы ни изменяли способ проекции изображения на сетчатку с угловым размером 2β.

Изображению соответствует некоторая картина на местности, которая преобразуется в масштабе Γ. При наблюдении невооруженным глазом $\Gamma = 1$ и $\beta = \beta'$. При любом увеличении $\operatorname{tg}\beta = (\operatorname{tg}\beta')/\Gamma$ [см. формулу (179)]. Таким образом, чем больше увеличение, тем меньше площадь, видимая на местности. Зато эта площадь видна в большем масштабе: на меньшей площади мы сможем различать более мелкие детали, так что общее число деталей остается примерно тем же. Наглядно вариации увеличения можно представить себе так. У нас имеется лист бумаги, на котором изображена карта какой-то местности. Можно взять карту большой площади в малом масштабе или карту небольшой части этой площади, но в большом масштабе. Выбор

будет обусловлен тем, что нас интересует: общая ориентировка на местности или подробное изучение ее небольшого участка, отыскание малых деталей на нем.

Визуальный оптический прибор не увеличивает количества поступающей в глаз информации. Больше того, из-за неизбежных в приборе аберраций и рассеянного света, снижающего контрасты, количество информации уменьшается. Но зато телескопический прибор может помочь заметить, опознать или детально рассмотреть интересующий наблюдателя объект.

Пусть, например, пастух разыскивает отбившуюся от стада овцу. Если средняя яркость поля 100 кд/м^2, а контраст овцы с фоном 0,05, ее можно заметить под углом δ, не меньшим 5,4′ [см. формулу (140)]. Приняв, что размер овцы 0,9 м, получим, что увидеть ее можно с расстояния не большего, чем 580 м. Если же пастух воспользуется шестикратным биноклем, эта дистанция возрастет до 3,5 км (правда, действие атмосферы уменьшит это расстояние). Целесообразность применения бинокля в данном случае несомненна. И потеря в количестве информации — как бы плата за ее размен — вполне оправданна.

Более подробное рассмотрение вопроса, насколько полезны могут быть оптические приборы, относится к области прагматических проблем теории информации, определяющих практическую ценность получаемой информации. Эти проблемы еще мало изучены. Поэтому мы ограничиваемся здесь только наглядным примером, приводя случай, когда применение бинокля безусловно полезно.

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ

СВОДКА РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ *

Оптика глаза. Размер (в радианах) изображения на сетчатке удаленного предмета, видимого под углом α

$$y' = \alpha f, \tag{12}$$

где $f = -17{,}06$ мм — переднее фокусное расстояние глаза.

Аметропия

$$A_R = \frac{1}{l_R}, \tag{23}$$

где l_R — расстояние, м, до наиболее удаленного объекта, который виден отчетливо при покое аккомодации. Оптическая сила корригирующей линзы приблизительно равна аметропии глаза.

Объем аккомодации

$$A_{PR} = \frac{1}{l_R} - \frac{1}{l_P}, \tag{24}$$

* Число в скобках указывает номер формулы в тексте. В некоторых случаях вид формулы несколько изменен без изменения ее смысла.

где l_P — расстояние до объекта, который виден отчетливо при максимальной аккомодации.

Оптическая сила очков для работы в зависимости от возраста T (в годах) в среднем равна

$$A_{\text{п}} = A_R + \frac{T - 30}{10}. \tag{25}$$

Диаметр зрачка глаза в миллиметрах в зависимости от яркости L (в кд/м^2)

$$d_{\text{г}} = 5 - 3 \operatorname{th}(0{,}4 \lg L). \tag{22}$$

Фотометрия. Если сила света J (в канделах) одинакова по всем направлениям внутри телесного угла $\Delta\omega$ (в стерадианах), световой поток в нем

$$\Delta\Phi = J\Delta\omega. \tag{28}$$

Освещенность (в люксах) поверхности с площадью $\Delta\sigma$ (в м^2), на которую падает поток $\Delta\Phi$ (в люменах),

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\sigma}. \tag{29}$$

Яркость (в кд/м^2) поверхности площадью $\Delta\sigma$ (в м^2), сила света которой в направлении нормали равна ΔJ (в канделах),

$$L = \frac{\Delta J}{\Delta\sigma}. \tag{30}$$

Яркость поверхности, подчиняющейся закону Ламберта, освещенность которой E и коэффициент отражения ρ,

$$L = \frac{\rho}{\pi} E. \tag{31}$$

Световой поток, соответствующий излучению, спектральная плотность мощности которого P_λ,

$$\Phi = K_m \int_0^\infty P_\lambda V(\lambda)\, d\lambda; \tag{37}$$

$K_m = 683$ лм/вт; $V(\lambda)$ — относительная спектральная световая эффективность излучения.

Световая чувствительность

$$S_{\text{с}} = 1/L_{\text{п}}, \tag{49}$$

где $L_{\text{п}}$ — пороговая яркость, которая зависит от состояния адаптации, места изображения на сетчатке и углового размера стимула. Для точечного источника световая чувствительность характеризуется пороговым блеском E_∞.

Если источник воздействует на глаз только короткое время τ, его пороговый блеск

$$E = \left(1 + \frac{\vartheta}{\tau}\right) E_\infty. \tag{90}$$

При центральном зрении, если яркость фона $L \leqslant 10^{-3}$ кд/м², то $E_\infty = 2 \cdot 10^{-8}$ лк; при яркости фона $L \geqslant 10^{-3}$ кд/м²

$$E_\infty = 1{,}6 \cdot 10^{-7} L^{\gamma}, \tag{143}$$

где

$$\gamma = \begin{cases} 0{,}6 + 0{,}1 \lg L & \text{при } L \leqslant 30 \text{ кд/м}^2; \\ 0{,}75 & \text{при } L \geqslant 30 \text{ кд/м}^2; \end{cases} \tag{144}$$

$$\vartheta = 0{,}13 - 0{,}08 \operatorname{th}(\lg L + 1). \tag{99}$$

Острота зрения

$$V = \frac{1}{\delta}, \tag{21}$$

где δ — предельный угол разрешения, ...′ .

Дифракционный предел разрешения (в минутах)

$$\delta = \frac{2{,}33}{D}, \tag{155}$$

где D — диаметр входного зрачка, в мм.

При контрасте $K = 1$ предельный угол разрешения (в минутах) зависит от яркости так:

$$\delta_1 = 0{,}45 + 0{,}64 L^{-0{,}42}. \tag{132}$$

При любом контрасте K приближенное значение предельного угла

$$\delta = \frac{0{,}44 + 0{,}63 L^{-0{,}42}}{(K - 0{,}02)^{2/3}}. \tag{140}$$

Зрительный поиск. За время t объект можно обнаружить с вероятностью

$$W = 1 - e^{-t/t_{\text{ср}}}. \tag{145}$$

Для протяженного объекта

$$t_{\text{ср}} = \frac{(2\beta)^2}{a_b K^2 \delta^3 L^{0.3}}; \tag{146}$$

2β — угловой диаметр поля зрения (...⁰), имеющего равномерную яркость L; δ — угловой размер объекта, ...′; K — его контраст с фоном. Среднее значение $\alpha_b = 16$.

Для точечного объекта, блеск которого E (в люксах) при $L \geqslant 10^{-3}$ кд/м²

$$t_{\text{ср}} = \frac{(2\beta)^2 L^{2\gamma}}{a_b E^2}, \tag{147}$$

где γ определяется формулой (144). Среднее значение $a_b = 2{,}6 \cdot 10^{14}$.

Эффективные величины. Если яркость L или контраст K воздействуют на зрение только короткое время τ, воспринимаются

эффективные величины — эффективная яркость $L_э$ или эффективный контраст $K_э$:

$$L_э = L(1 - e^{-\tau/\vartheta}); \tag{141}$$

$$K_э = K(1 - e^{-\tau/\vartheta}). \tag{82}$$

Если $\tau \ll \vartheta$

$$L_э = L\tau/\vartheta; \tag{142}$$

$$K_э = K\tau/\vartheta. \tag{76}$$

Зрительный комфорт. Коэффициент естественной освещенности (в процентах)

$$K_{е.о} = \frac{E_в}{E_н} \cdot 100, \tag{165}$$

где $E_в$ — освещенность некоторой точки заданной плоскости внутри помещения; $E_н$ — одновременно измеренная наружная горизонтальная освещенность под открытым полностью небосводом. Участие прямого солнечного света в создании той и другой освещенности исключается.

Комфортная зона искусственной освещенности E в зависимости от цветовой температуры освещающего света $T_ц$ изображена на рис. 43.

Показатель ослепленности

$$s = 1000\frac{L_в}{L}; \tag{167}$$

$$L_в = m_b\frac{E}{\theta^2}, \tag{168}$$

где L — яркость адаптации; $L_в$ — эквивалентная яркость вуалирующей дымки; E — освещенность на зрачке от блеского источника, отстоящего на угол θ (в градусах) от зрительной оси; $m_в \approx 10$.

Показатель дискомфорта

$$M_д = \frac{L_б}{\varphi(\theta)}\sqrt{\frac{\omega}{L}}, \tag{170}$$

где $L_б$ — яркость блеского источника; ω — телесный угол, ср, под которым источник виден; $\varphi(\theta)$ — индекс позиции (см. рис. 42). При $M_д = 25$ половина наблюдателей не отмечает дискомфорта.

Максимальные допустимые значения: $M = 60$; $s = 60$.

Освещенность и зрительная работоспособность. Зрительная работоспособность

$$\eta = \frac{1}{\tau}W, \tag{174}$$

где $1/\tau$ — быстрота различения; W — вероятность правильных действий

$$\frac{1}{\tau} = \frac{0{,}434}{\vartheta \lg \frac{V_к}{V_к - 1}}, \tag{172}$$

где $V_к = K/K_п$ — отношение контраста различаемых объектов к пороговому контрасту объектов того же размера при той же яркости; θ — см. формулу (99).

Быстрота различения растет с яркостью фона:

$$1/\tau = a + b \lg L, \tag{173}$$

где a и b — коэффициенты, зависящие от размера объекта α и его контраста K.

Освещенность E, обеспечивающая относительную работоспособность $\eta_0 = 0{,}9$ ($\eta_0 = \eta/\eta_m$, где η_m — работоспособность при оптимальной освещенности), при $K = 0{,}25$ выражается формулой

$$E = \frac{1900}{\rho\alpha^{1{,}5}}, \tag{175}$$

где α — размер объекта в минутах, ρ — коэффициент отражения рабочей поверхности.

Вооруженный глаз. Минимальный размер детали, которую можно различить с помощью микроскопа,

$$h = \frac{\lambda}{2n \sin u}, \tag{178}$$

где λ — длина волны используемого света; n — показатель преломления среды, в которую погружены объект и переднее стекло объектива; u — угол между осью микроскопа и крайним лучом, входящим в объектив.

У современных оптических микроскопов $h \approx {}^1/_3\lambda$.

Увеличение телескопа

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg}\alpha'}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{\operatorname{tg}\beta'}{\operatorname{tg}\beta} = \frac{f_b}{f_k} = \frac{D}{D'}, \tag{179}$$

где α угол, под которым виден объект без телескопа, α' — в телескоп; β — половина угла поля зрения объектива, а β' — окуляра; D — диаметр входного зрачка, а D' — выходного.

При условии, что $D' \leqslant d$ (d — диаметр зрачка глаза), предельный угол, разрешаемый телескопом,

$$\delta = \frac{1{,}22\lambda}{D}; \tag{180}$$

здесь D и λ должны выражаться в одних единицах, а δ — в радианах.

Количество информации, которое может содержаться в изображении, передаваемым телескопом,

$$H = 2\pi \int_0^{\beta} \frac{u\,du}{\delta^2(u)}, \tag{151}$$

где u — угол между осью телескопа и направлением на некоторую точку в поле зрения объектива; $\delta(u)$ — предельный угол как функция u; $\delta(u)$ и β — в минутах.

Для идеального прибора

$$H_0 = 2{,}09 \cdot 10^5 D^2 \beta^2 \qquad (157)$$

(H_0 — в битах, D — в сантиметрах, β — в градусах).

Информационный коэффициент качества прибора

$$k = H/H_0. \qquad (154)$$

1. **Белова Л. Т.** Определенне быстроты различения объектов по их параметрам и яркости фона. — Светотехника, 1966, № 7.
2. **Болдырев Н. Г.** Энергетическне соотношения, описывающие явления зрительного воспрнятия. — Проблемы физиологической оптики, 1943, т. 6.
3. **Болдырев Н. Г.** Экспериментальное подтверждение энергетической теории зрения. — Проблемы физиологической оптики, 1953, т. 8.
4. **Вавилов С. И.** Глаз и солнце.— М.: Изд-во АН СССР, 1961.
5. **Вавилов С. И.** Микроструктура света. — М.: Изд-во АН СССР, 1950.
6. **Вавилов С. И.** Вступительное слово на совещании по люминесценции 5—10 октября 1944 г. — Собр. соч., т. II. — М.: Изд-во АН СССР, 1952.
7. **Вейнберг В. Б.** К вопросу о дальности видимости предметов. — Проблемы физиологической оптики, 1946. т. 3.
8. **Волков В. В., Горбань А. И., Джалиашвили О. А.** Клиническая визо- и рефрактометрия. — Л.: Медицина, 1976.
9. **Волькенштейн А. А.** Визуальная фотометрия малых яркостей. — М. — Л.: Энергия, 1965.
10. **Гассовский Л. Н., Никольская Н. А.** Подвижность глаза в процессе фиксации. — Проблемы физиологической оптики, 1941, т. 1.
11. **Гершун А. А.** Принципы и приемы светомаскировки. — М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1943.
12. **Глезер В. Д.** Механизмы опознавания зрительных образов. — М. — Л.: Наука, 1966.
13. **Глезер В. Д., Цуккерман И. И.** Информация и зрение. — М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1961.
14. **Голдовский Е. М.** Физические основы кинотехники. — М.: Госкиноиздат, 1939.
15. **Гончаров Н. П.** Исследование зрительной работоспособности при естественном, искусственном и совмещением освещении. — В кн.: Труды НИИ строит. физики, 1975.
16. **Гуревич М. М.** Введение в фотометрию. — Л.: Энергия, 1968.
17. **Гуревич М. М.** Цвет и его измерения. — М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1950.
18. **Естественное и искусственное освещение.** Нормы проектирования СН и П II-4—79.— Светотехника, 1979, № 10.
19. **Забелина И. А.** Расчет видимости звезд и далеких огней. — Л.: Машиностроение, 1978.
20. **Исследование принципов** переработки информации в зрительной системе/ Под ред. В. Д. Глезера, А. Пенчева. — Л.: Наука, 1970.
21. **Качко Е. Г., Бондаренко М. Ф.** К вопросу об общей структуре оператора временного сглаживания периодическнх мелькаиий яркости. — В кн.: Проблемы бионики, Харьков, 1971, вып. 7.
22. **Кравков С. В.** Глаз и его работа. — М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1950.
23. **Кроль Ц. И., Терешкевич С. Г.** Принципы нормирования освещения в общесоюзных нормах по комплексной оценке световой среды производственных помещений. — Светотехника, 1982, № 1.
24. **Круглов С. И., Ханнолайнеи А. К.** Устройство для регистрации движений глаз. — ОМП, 1975, № 9.

25. **Луизов А. В.** Изображение на сетчатке и его преобразование в зрительной системе. — Успехи научной фотографии, 1964, т. 10.
26. **Луизов А. В.** Инерция зрения. — М.: Оборонгиз, 1961.
27. **Луизов А. В.** Физика зрения. — М.: Знание, 1976.
28. **Луизов А. В., Травникова Н. П.** Пороговый блеск в зависимости от яркости фона. — ОМП, 1975, № 12.
29. **Луизов А. В., Федорова Н. С.** Глаз как приемник информации. — В кн.: Специальные вопросы светотехники в охране труда. — М.: 1975.
30. **Луизов А. В., Федорова Н. С.** Зависимость остроты зрения от яркости фона. — Доклады АН СССР, 1973, т. 210, № 1.
31. **Луизов А. В., Федорова Н. С.** Информационный критерий качества оптического прибора. — ОМП, 1971, № 6.
32. **Луизов А. В., Федорова Н. С.** Освещение и зрительная информация.— Светотехника, 1976, № 2.
33. **Луизов А. В., Федорова Н. С.** Число градаций яркости, различимое глазом. — ОМП, 1973, № 10.
34. **Международный светотехнический словарь.** 3-е изд. — М.: Русский язык, 1979.
35. **Мешков В. В.** Основы светотехники. Ч. II. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1961.
36. **Мешков В. В., Епанешников М. М.** Осветительные установки. — М.: Энергия, 1972.
37. **Офтальмоэргономика.**— Сборник научных трудов под редакцией Э. С. Аветисова. М.: Минздрав СССР, МНИИ глазных болезней имени Гельмгольца, 1976.
38. **Пинегин Н. И.** Квантовые флуктуации и их измерение при помощи глаза. — В кн.: Труды сессии, посвященной памяти акад. С. И. Вавилова.— М.: Обороиздат, 1953.
39. **Пинегин Н. И., Травникова Н. П.** Зависимость остроты зрения от места на сетчатке, контраста и времени наблюдения. — В кн.: Труды ГОИ, Л., 1960, т. 28, вып. 157.
40. **Пинегин Н. И., Травникова Н. П.** Зависимость пороговой освещенности на зрачке глаза, создаваемой неподвижным точечным источником света от яркости фона. — Доклады АН СССР, 1963, т. 148, № 6.
41. **Раутиан Г. Н., Пинегин Н. И.** Острота зрения в зависимости от яркости и контраста. — В кн.: Труды первой конференции по физиологической оптике. — М. — Л.: Изд-во АН СССР, 1936.
42. **Роуз А.** Зрение человека и электронное зрение. — М.: Мир, 1977.
43. **Самсонова В. Г.** Зависимость времени различения от угловых размеров центрального поля, его яркости и отношения яркостей периферического и центрального полей в условиях световой адаптации. — Проблемы физиологической оптики, 1944, т. 2.
44. **Сеченов И. М.** Избранные произведения. Т. II. Физиология нервной системы. — М.: Изд-во АН СССР, 1956.
45. **Справочник по офтальмологии**/Под ред. Э. С. Аветисова. — М.: Медицина, 1978.
46. **Травникова Н. П.** Визуальное обнаружение протяженных объектов. — ОМП, 1977, № 3.
47. **Травникова Н. П.** Визуальное обнаружение точечных источников света. — Светотехника, 1978, № 2.
48. **Физиология сенсорных систем.** Ч. 1. Физиология зрения/Под ред. Г. В. Гершуни. — М.: Наука, 1971.
49. **Шабанов-Кушнаренко Ю. П., Сердюченко В. А.** К вопросу моделирования краевого контраста. — Проблемы бионики, Харьков, 1970, вып. 2.
50. **Энциклопедия кибернетики.** Т. 2. — Киев: Советская энциклопедия, 1975.
51. **Ярбус А. Л.** Роль движений глаз в процессе зрения. — М.: Наука, 1965.
52. **Allard M. E.** Mémoire sur l'intensité et la portée des phares. — Paris, 1976.
53. **Blondel A., Rey J.** Sur la perception des lumières, brèves á la limite de leur portée. — J. de Physique, 1911.

54. **Bower T. G. R.** Visual world of infants.-— Scient. Am., 1966, v. 215. № 2.
55. **Harte R. A.** Receptor elements of the human retina as semiconductors.— J. Opt. Soc. Amer., 1961, v. 51, № 11.
56. **Lange Dzn H.** Relationship between critical flicker-frequency and a set of low-frequency characteristics of the eye. — J. Opt. Soc. Amer., 1954, v. 44, № 5.
57 **Rengstorff R. H., Duffy F. H.** Visual evoked responses: technique to measure refractive error. — Optometric weekly, 1971, v. 62, № 30.
58. **Singer J. R.** Information theory and the human visual system. — J. Opt. Soc. Amer., 1959, v. 49, № 6.
59. **Snyder A. W., Pask C.** The Stiles — Crawford effect examination and consequence. — Vision Res., 1973, v. 13. № 6.
60. **Wiener N.** Cybernetics or control and communication in the animal and machine. — New York, 1948.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Основные обозначения 3
Введение 4

Глава первая. ОРГАН ЗРЕНИЯ 7

1. Что называется глазом? . . . . . —
2. Глазное яблоко . . . . . —
3. Нервные связи глаза 8
4. Глазодвигательная система 10
5. Взаимодействие частей органа зрения . . . . . —

Глава вторая. ОПТИКА ГЛАЗА 10

6. Филогенетическое развитие глаза . . . . . —
7. Глаз — камера-обскура 11
8. Фасеточный глаз 13
9. Глаз человека 14
10. Схематический глаз . . . . . —
11. Построение изображения в глазе 16
12. Редуцированный глаз 17
13. Аберрации глаза 20

Глава третья. АМЕТРОПИЯ И КОРРЕКЦИЯ ЗРЕНИЯ 23

14. Эмметропический глаз . . . . . —
15. Аметропия . . . . . —
16. Очки 25
17. Измерение аметропии 26
18. Контактные линзы 30
19. Пресбиопия 31

Глава четвертая. СЕТЧАТКА 32

20. Анатомия сетчатки . . . . . —
21. Пигменты сетчатки 35
22. Строение колбочки 36
23. Форма и кровоснабжение сетчатки . . . . . —

Глава пятая. СВЕТОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ 37

24. Основы фотометрии . . . . . —
25. Спектральная чувствительность 39
26. Эффект Пуркинье 42
27. Эквивалентная яркость 43
28. Пороговая яркость 44
29. Квантовый порог чувствительности 47

Глава шестая. АДАПТАЦИЯ 48

30. Диапазон воспринимаемых глазом яркостей . . . . . —
31. Световая адаптация . . . . . —

32. Темновая адаптация. Адаптометр 49
33. Факторы, повышающие световую чувствительность при адаптации 52

Глава седьмая. ДВИЖЕНИЕ ГЛАЗ 53

34. Поле зрения глаз . . . . . —
35. Изменение точки фиксации взора 55
36. Регистрация движений глаз 56
37. Стереоскопическое зрение 57
38. Движение глаз при фиксации точки 59
39. Стабилизация изображений на сетчатке 60

Глава восьмая. КОДИРОВАНИЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ 61

40. Взаимодействие двух глаз . . . . . —
41. Закон Вебера — Фехнера 62
42. Электрические явления в зрительной системе 64
43. Модель зрительной системы 66
44. Соотиесенность 67
45. Некоторые детали процесса кодирования 68
46. Полосы Маха 69
47. Кооперация рецепторов . . . . . —
48. Осмысление изображений и опознавание образов 70
49. Зрение и кибернетика 71

Глава девятая. ИНЕРЦИЯ ЗРЕНИЯ . . . . . —

50. Механическая аналогия . . . . . —
51. Эффективная яркость 73
52. Вычисление эффективной яркости 74
53. Время инерции 76
54. Эффективные величины 77
55. Эффективный контраст 78
56. Экспериментальное определение времени инерции . . . . . —
57. Функция затухания 79
58. Эффективный контраст движущегося тела 80
59. Эффективный блеск 82
60. Видимость проблесковых огней 83
61. Суммирование световых воздействий 85
62. Два вида функции затухания 87
63. Инерция и локальная адаптация . . . . . —

Глава десятая. СТРОБОСКОП 88

64. Диск-обтюратор . . . . . —
65. Критическая частота слияния мельканий 89
66. Наблюдение периодических процессов 90
67. Наблюдение тела, движущегося поступательно 91
68. Стробоскопический эффект газоразрядных ламп 92

Глава одиннадцатая. ЯРКОСТЬ И ОСТРОТА ЗРЕНИЯ 93

69. Квантовые флуктуации света . . . . . —
70. Опыты С. И. Вавилова 95
71. Квантовые флуктуации и разрешающая способность зрительного прибора 96
72. Биологическая роль инерции зрения 101

Глава двенадцатая. ПОРОГОВЫЕ УСЛОВИЯ . . . . . —

73. Система зрительных функций . . . . . —
74. Пороговая видимость протяженного объекта 102
75. Фактор времени 104
76. Видимость точечного источника . . . . . —
77. Зрительный поиск 105

Глава триидцвтая. ГЛАЗ КАК ПРИЕМНИК ИНФОРМАЦИИ 107

78. Пропускная способность зрения . . . . . —
79. Количество информации 108
80. Освещенность и зрительная информация 110
81. Пропускная способность зрения в целом 111

Глава четыриадцатая. СВЕТ И ЦВЕТ . . . . . —

82. Качество света . . . . . —
83. Система *RGB* 112
84. Цветность 114
85. Система *XYZ* 115
86. Колориметрические расчеты . . . . . —
87. Цветовые пороги 116

Глава пятиадцатая. ЗРИТЕЛЬНЫЙ КОМФОРТ 117

88. Основные характеристики освещения . . . . . —
89. Неравномерность освещения 118
90. Ослепленность . . . . . —
91. Дискомфорт 119
92. Комфортные условия 120

Глава шестиадцатая. ОСВЕЩЕНИЕ И РАБОТА. 121

93. Зрительная работа . . . . . —
94. Быстрота различения 122
95. Освещенность и производительность труда 123

Глава семиадцатая. ВООРУЖЕННЫЙ ГЛАЗ. 124

96. Приборы, работающие совместно с глазом . . . . . —
97. Микроскоп . . . . . —
98. Телескоп 126
99. Размен информации 128

Глава восемнадцатая. СВОДКА РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ. 129

Список литературы 135

Андрей Владимирович Луизов

ГЛАЗ И СВЕТ

Научный редактор *Д. Н. Лазарев*
Редактор *Ю. В. Долгополова*
Художественный редактор *Д. Р. Стеванович*
Технический редактор *Н. А. Минеева*
Корректор *А. Н. Акимов*
Обложка художника *Ю. И. Прошлецова*

ИБ № 2465

Сдано в набор 21.07.82. Подписано в печать 10.01.83. М-23768. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Высокая печать. Усл. печ. л. 9. Усл. кр.-отт. 9.13. Уч.-изд. л. 10,31. Тираж 13 000 экз. Заказ 273. Цена 55 к.

Ленинградское отделение Энергоатомиздата.
191041, Ленинград, Марсово поле, 1.

Ленинградская типография № 2 головное предприятие ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 198052, г. Ленинград, Л-52, Измайловский пр., 29.

55 к.